

**การศึกษาและวิเคราะห์การลดสัญญาณเสียงสะท้อนในระบบ VOIP  
THESIS TITLE A CASE STUDY AND ANALYSIS OF ECHO CANCELLER  
FOR VOICE OVER IP**



**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**

**ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THESIS TITLE A CASE STUDY AND ANALYSIS OF ECHO CANCELLER  
FOR VOICE OVER IP**



**BY**

**Mr. BANCHA**

**KATEKAEW**

**Mr. WITON**

**GUNTA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF THE INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECCHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและวิเคราะห์การลดสัญญาณเสียงสะท้อนในระบบ VoIP

THESIS TITLE

A case study and analysis of echo canceller for VoIP

ชื่อนักศึกษา

นายบัญชา เกตุแก้ว รหัสนักศึกษา 47012113

นายวิฑูร กันทา รหัสนักศึกษา 47012141

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ. คลชัย สุขเจริญผล

ระดับการศึกษา

ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2550

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง



.....  
1

(ผศ.คลชัย สุขเจริญผล)

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาและวิเคราะห์การลดสัญญาณเสียงสะท้อนในระบบ VoIP

THESIS TITLE

A CASE STUDY AND ANALYSIS OF ECHO CANCELLER

FOR VOIP

ชื่อนักศึกษา

นายบัญชา เกตุแก้ว รหัสนักศึกษา 47012113  
นายวิฑูร กันทา รหัสนักศึกษา 47012141

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ. ดลชัย สุขเจริญผล

ระดับการศึกษา

ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2550

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์สัญญาณเสียงสะท้อน(speech echo) ในระบบ Voice Over IP (VOIP) ซึ่งกำลังนำมาใช้มากในหน่วยงานต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารและลดต้นทุน แต่การจำกัดของแถบความถี่ที่ให้บริการและการรบกวนจากการสะท้อนเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องศึกษาและแก้ไขเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าทั้งในเชิงเวลา(time domain)และเชิงความถี่(frequency domain) และในกระบวนการลดทอนสัญญาณสะท้อนได้ใช้ตัวกรองแบบปรับตัว(Adaptive Filter) ที่ใช้อัลกอริทึมแบบ LMS(least mean square error) ซึ่งผลในการวิเคราะห์และการจำลองกระบวนการลดทอนสัญญาณสะท้อนด้วยโปรแกรม Simulink ของ MATLAB™

**Thesis Title** A CASE STUDY AND ANALYSIS OF ECHO CANCELLER FOR VOIP

**Student** Mr. Bancha Karekaew No. 47012113  
Mr. Witoon Gunta No. 47012141

**Advisor** Assistant Prof. Dolchai sukcharoernphol

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2007

### Abstract

This project is analysis of speech echo effect and their cancellation in VoIP system. The system has popular uses in many organizes for improve the speech communication and cost reduce. However, the limit of usage bandwidth and echo distortion on the channel is a mainly problems to investigation. The echo signal is analyzed both in the time domain and the frequency domain. The echo signal can be reduced using adaptive filter which base on LMS algorithm. An echo cancellation process is simulated using Simulink in MATLAB software program.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับการช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายฝ่ายด้วยกัน บุคคลที่ต้องกล่าวถึงเพราะมีความสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลงได้คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์คลชัย สุขเจริญผล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร และ พ่อ แม่ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ที่ให้ความเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ และคอยให้ความช่วยเหลือตลอดเวลาทั้งหมดที่ทำให้ปริญญาบัตรนี้จึงขอบพระคุณมา ณ ที่นี้เป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดเริ่มต้นในการทำโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 Voice over Internet Protocol (VoIP)	3
2.1.1 หลักการพื้นฐานของเครือข่าย IP	6
2.1.2 ความแตกต่างระหว่างระบบสื่อสารแบบ VOIP กับระบบโทรศัพท์พื้นฐานทั่วไป	8
2.1.3 เทคโนโลยีและการทำงานของ VOIP	9
2.1.3.1 H.323 Standard	10
2.1.3.2 SIP (Session Initiation Protocol) Standard	10
2.1.3.3 การทำงานของ VOIP	10
2.1.4 ส่วนจัดการการสื่อสาร (The Call Processing module)	15
2.1.5 Packet Processing module	15
2.1.5.1 องค์ประกอบของ H.323	15
2.1.5.2 ลำดับชั้นของ H.323 Terminal	16
2.2 การกำจัดสัญญาณสะท้อน	17
2.2.1 สัญญาณสะท้อนในสายโทรศัพท์	19

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.2.1.1 การลดสัญญาณสะท้อน	20
2.2.1.2 ตัวกรองในการลดสัญญาณสะท้อน	21
2.2.1.3 ความหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนในเครือข่ายโทรศัพท์	22
2.2.1.4 ค่าความสูญเสียของสัญญาณสะท้อน	23
2.2.1.5 รูปแบบในการปรับค่ากำจัดสัญญาณสะท้อน	24
2.2.2 สัญญาณสะท้อนทางเสียง (Acoustic Echo)	25
2.2.2.1 ตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนทางเสียงด้วย sub-band	30
บทที่ 3 อะแดปทีฟฟิลเตอร์	32
3.1 ตัวกรองความถี่หรือฟิลเตอร์	33
3.1.1 ตัวกรองความถี่แบบ FIR (Finite impulse response)	34
3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของอะแดปทีฟฟิลเตอร์	36
3.2.1 โครงสร้างของอะแดปทีฟฟิลเตอร์	36
3.2.2 วงจรกรองความถี่ปรับตัวได้แบบเอฟไออาร์ (Adaptive FIR Filter)	38
3.3 ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean squares, LMS)	41
3.4 อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalised Least Mean Square)	42
บทที่ 4 การออกแบบและวิธีการดำเนินการวิจัย	45
4.1 การใช้โปรแกรม simulink เพื่อจำลองการทำงานของฟิลเตอร์	45
4.1.1 การเชื่อมต่อบล็อก	47
4.1.2 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น	47
4.2 ตัวอย่างการจำลองฟิลเตอร์แบบ FIR ด้วยโปรแกรม Simulink	54
4.3 ตัวอย่างการสร้างรูปแบบ Simulink ของวงจร	56
อะแดปทีฟฟิลเตอร์แบบ NLMS ที่จะใช้ ในการลดสัญญาณรบกวน	
4.3.1 รูปแบบของ ซิมูลิงค์ ที่ใช้ในการทดลอง อัลกอริทึม แบบ NLMS	56
4.3.2 ผลจากการจำลองสัญญาณจากตัวกรองแบบ NLMS	61

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	66
5.1 ผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) ด้วยอัลกอริทึมแบบ ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด	67
5.1.1 ผลจากตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดอัลกอริทึม ที่ step-size 0.002	67
5.1.2 ผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดอัลกอริทึม ที่ step-size 0.01	69
5.2 ผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) ด้วยอัลกอริทึมกำลัง สองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัล ไลซ์	70
5.2.1 ผลจากอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด แบบนอร์มัล ไลซ์อัลกอริทึม ที่ step-size 0.002	71
5.2.2 ผลจากอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด แบบนอร์มัล ไลซ์อัลกอริทึม ที่ step-size 0.04	73
5.3 ผลจากการทดลอง	75
บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์	75
6.1 บทสรุป	75
6.2 บทวิจารณ์	76
6.3 ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน	76
6.4 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาศึกษาต่อ	76

## สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง

หน้า

บรรณานุกรม

77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

ภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ VoIP	3
รูปที่ 2.2 การสื่อสารแบบ Pc to Pc	5
รูปที่ 2.3 การสื่อสารแบบ Pc to Phone	5
รูปที่ 2.4 การสื่อสารแบบ Phone to Phone	6
รูปที่ 2.5 การส่งสัญญาณผ่าน VoIP Gateway	6
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล	11
รูปที่ 2.7 การลดสัญญาณสะท้อน	11
รูปที่ 2.8 การจัดเฟรม	12
รูปที่ 2.9 การจัดแพ็คเกจ	12
รูปที่ 2.10 การใส่ไอทีปลายทาง	13
รูปที่ 2.11 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก	13
รูปที่ 2.12 Block diagram ของ Voice Processing Module	14
รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)	14
รูปที่ 2.14 ลำดับชั้นของ H.323	16
รูปที่ 2.15 แสดงสัญญาณสะท้อนในระบบโทรศัพท์	18
รูปที่ 2.16 แสดงการสื่อสาร โทรศัพท์แบบ 2-wire และ 4-wire	19
รูปที่ 2.17 แสดงการติดต่อของวงจร 2-wire ถึง 4-wire	20
รูปที่ 2.18 แสดงระบบการลดสัญญาณสะท้อน	20
รูปที่ 2.19 แสดงระบบการปรับค่าของการลดสัญญาณสะท้อน	22
รูปที่ 2.20 แสดงการลดสัญญาณสะท้อนโดยใช้ตัวกรองปรับค่าได้แบบ FIR	24
รูปที่ 2.21 แสดงระบบการปรับแต่งค่าสัญญาณสะท้อนใน ไมโครโฟน – ลำโพง – ห้อง	27
รูปที่ 2.22 แสดงการปรับค่าของการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียง ในสภาวะแวดล้อมในห้อง	27
รูปที่ 2.23 การปรับการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงทั้งหมดในระบบ	29
รูปที่ 2.24 การรวมของระบบการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงแบบ sub-band	30
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวกรองความถี่แบบ FIR	35
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของอะแดปทีฟฟิลเตอร์	37
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของ supervised อะแดปทีฟฟิลเตอร์	38

# สารบัญรูป

ภาพ	หน้า
รูปที่ 3.4 แสดงการปรับค่าของสัมประสิทธิ์ของตัวแบบ LMS	42
รูปที่ 4.1 เมนูการใช้งาน simulink	46
รูปที่ 4.2 แสดงการเชื่อมต่อบล็อก	47
รูปที่ 4.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และปลายทางสัญญาณ (Sinks)	48
รูปที่ 4.4 แสดงระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)	49
รูปที่ 4.5 กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์	50
รูปที่ 4.6 แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities	51
รูปที่ 4.7 บล็อกในหมวด User-defined Functions	52
รูปที่ 4.8 แสดงบล็อกทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)	53
รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของวงจรกรอง FIR	55
รูปที่ 4.10 แสดงระบบย่อยของโครงสร้างของวงจรกรอง FIR	55
รูปที่ 4.11 แสดง Block ของ FIR Filters	56
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการใช้งานอัลกอริทึม NLMS	56
รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในบล็อกของ sine wave	57
รูปที่ 4.14 แสดง Block random source ในการจำลองค่าสัญญาณรบกวน	58
รูปที่ 4.15 แสดงการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของ LMS	59
รูปที่ 4.16 แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของ NLMS	59
รูปที่ 4.17 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของ NLMS	60
รูปที่ 4.18 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 32, step-size 0.05 ( $\mu$ );	61
รูปที่ 4.19 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 32, step-size 0.5 ( $\mu$ );	62
รูปที่ 4.20 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 64, step-size 0.5 ( $\mu$ );	63
รูปที่ 4.21 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 64, step-size 0.05 ( $\mu$ );	64
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างรูปแบบของซิมูลิงค์ที่จะใช้ในการลดสัญญาณสะท้อน	66
รูปที่ 5.2 บล็อกที่ใช้สร้างสัญญาณรบกวน	67
รูปที่ 5.3 แสดงผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม ที่ step-size 0.002	67

## สารบัญรูป

ภาพ	หน้า
รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน -สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ step-size 0.002 (LMS)	68
รูปที่ 5.5 แสดงผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม ที่ step-size 0.01	69
รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน -สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ step-size 0.01 (LMS)	70
รูปที่ 5.7 ผลของการปรับค่าที่ step-size 0.002 (nLMS)	71
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน -สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ step-size 0.002 (nLMS)	72
รูปที่ 5.9 ผลของการปรับค่าที่ step-size 0.04 (nLMS)	73
รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน -สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ step-size 0.04 (nLMS)	74

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของหัวข้อโครงการ

ในปัจจุบันการระบบ VoIP นั้นได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าระบบโทรศัพท์พื้นฐานทั่วไปรวมถึงการใช้ระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คที่มีอยู่แล้วให้เกิดประโยชน์มากขึ้น แต่ในทางปฏิบัติยังมีปัญหาอุปสรรคที่สำคัญคือสัญญาณสะท้อนในระบบซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนแบบหนึ่งในระบบข่าวสารที่มีความถี่ตรงกับเสียงพูดของมนุษย์โดยช่วงที่รบกวนนั้นเป็นสาเหตุให้การสนทนาทั้ง 2 ด้านสื่อสารกันอย่างไม่สมบูรณ์ และทำให้ประสิทธิภาพในการสื่อสารลดลง โครงการนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดเสียงสะท้อนในระบบ VoIP และศึกษาการลดเสียงสะท้อนในระบบ VoIP ซึ่งประการสำคัญของประโยชน์ที่ได้รับจากระบบ VoIP เป็นเรื่องการลดค่าใช้จ่ายในการโทรศัพท์ขององค์กร ไม่ว่าจะเป็นการโทรในพื้นที่เดียวกันหรือโทรทางไกล แม้กระทั่งการโทรต่างประเทศ ทั้งโทรภายในองค์กรเองหรือโทรติดต่อกับหน่วยงานอื่นๆหรือลูกค้า ส่วนแล้วแต่ได้รับประโยชน์ในเรื่องค่าใช้จ่ายในการโทรศัพท์ทั้งสิ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1. วิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนในระบบ VOIP
2. เพื่อศึกษาการทำงานของ Adaptive Filter และรูปแบบ Algorithm ที่ใช้กำจัดสัญญาณสะท้อน
3. เพื่อประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB ในจำลองและการประมวลผล

### 1.3 ขอบเขตโครงการ

- ศึกษาการทำงานของระบบ VOIP
- ศึกษาการทำงานและจำลองระบบของวงจรกรองความถี่ปรับตัวได้ (Adaptive filter)
- วิเคราะห์และศึกษาผลของการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB

### 1.4 ขั้นตอนของการทำโครงการ

ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	ช่วงระยะเวลา							
	2550							2551
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1. กำหนดปัญหาที่จะทำการศึกษา	↔							
2. ศึกษาข้อมูล		↔						
3. ออกแบบการทดลอง			↔					
4. วิเคราะห์ข้อมูล					↔			
5. สรุปผล							↔	

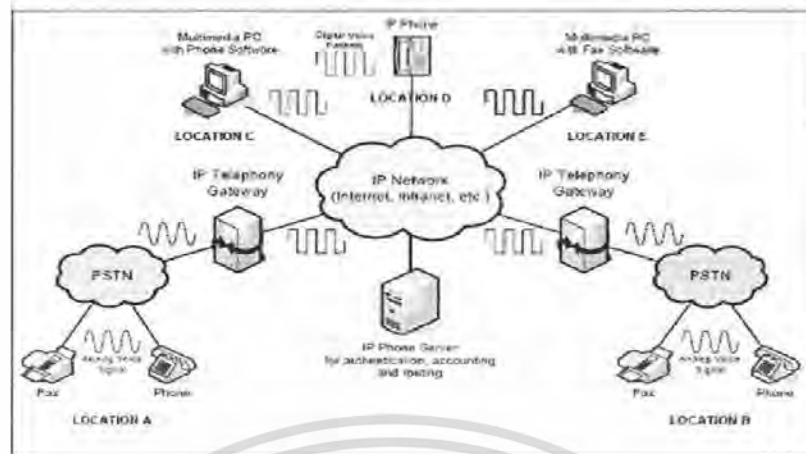
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 Voice over Internet Protocol (VoIP)

การนำสัญญาณเสียงมาผสมรวมเข้ากับสัญญาณข้อมูล เพื่อให้สามารถส่งผ่านไปบนระบบเครือข่ายด้วยโปรโตคอลที่มีอยู่อย่างแพร่หลาย คือ Internet Protocol หรือที่รู้จักกันทั่วไปในนามไอพี (IP) ซึ่งโดยปกติจะใช้ไอพีในการส่งสัญญาณข้อมูลเท่านั้น แต่ด้วยเทคโนโลยีวีโอไอพี (VoIP) นี้ทำให้สามารถพัฒนาการสื่อสารสัญญาณเสียงให้สามารถสื่อสารผ่านไอพีได้ ทำให้เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของการสื่อสารโทรศัพย์ได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งการติดต่อสื่อสารทางโทรศัพย์แต่เดิมนั้นเป็นระบบอนาล็อก (Analog) ซึ่งเป็นความสิ้นเปลืองทั้งเวลาและการใช้อุปกรณ์ ตัวอย่างเช่นการใช้สายโทรศัพย์เส้นหนึ่งต่อเชื่อมโทรศัพย์ต้นทางและปลายทาง พอร์บบต่อเชื่อมโทรศัพย์ได้แล้ว ก็หมายความว่า การจราจรบนสายโทรศัพย์เส้นนี้ถูกจองทั้งหมด เพื่อให้สัญญาณโทรศัพย์ทั้งสองเครื่องนี้ใช้สนทนากัน เมื่อสนทนากันเสร็จเรียบร้อยก็วางสาย สายโทรศัพย์เส้นนี้ก็ว่าง ก็หมายถึงถนนว่างแล้วให้รถยนต์คันอื่นวิ่งบ้าง ยกตัวอย่างนี้ให้เห็นว่าสมมติแบบนี้เป็นแบบอนาล็อก แต่ถ้าเป็นระบบดิจิทัล (digital) ใช้ถนนแบบเดียวกันเพียงแต่ว่ามีหลายเลน มีหลายช่องจราจร มีหลายระดับความเร็วแบ่งกันใช้ เมื่อเอาโทรศัพย์ที่สามารถใช้ระบบไอพี (IP Telephony) มาต่อเชื่อมก็เหมือนกับว่าโทรศัพย์ 2 เครื่องต่อผ่านสายโทรศัพย์เส้นหนึ่ง แต่การส่งสัญญาณกันไปมาข้อมูลจะถูกเปลี่ยนไอพีแพ็คเกจ (IP Packet) แล้วส่งออกไป ช่วงว่างก็จะเป็นโอกาสให้ผู้อื่นส่งบ้าง แบ่งช่องทางกัน แบ่งเวลากัน ดังนั้นช่วงเวลาเท่าๆ กันระบบโทรศัพย์ที่สามารถใช้ระบบไอพีใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ VoIP

Voice over IP (VoIP) ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในปี 1996 ในนิตยสาร CTI Magazine (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็น Communication Solutions Magazine) CTI หรือ Computer Telephony Integration Magazine ได้มีการวิจารณ์เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ทำให้คอมพิวเตอร์และการโทรศัพท์สามารถทำงานร่วมกัน ซึ่งมีการใช้งานครั้งแรกในธุรกิจศูนย์กลางโทรศัพท์ (Call Center) โดยเป็นการทำงานร่วมกับเครื่องตอบรับ โทรศัพท์อัตโนมัติ

วีโอไอพีเป็นมาตรฐานที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับส่งสัญญาณเสียงบนอินเทอร์เน็ตที่มีพื้นฐานอยู่บนหมายเลขไอพี (IP based Internet) การส่งเสียงบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นระบบที่นำสัญญาณข้อมูลเสียงมาบรรจุลงในไอพีแพ็กเก็ตแล้วส่งไป โดยที่เราเตอร์ (Router) มีวิธีการปรับตัวเพื่อรับสัญญาณแพ็กเก็ตและยังแก้ปัญหาบางอย่างให้ เช่น การบีบอัดสัญญาณเสียงให้มีขนาดเล็กลง การแก้ปัญหาเมื่อมีแพ็กเก็ตสูญหาย หรือได้มาล่าช้าระบบ วีโอไอพีเป็นระบบที่นำสัญญาณเสียงที่ผ่านการแปลงข้อมูลจากสัญญาณอนาล็อกมาเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยหนึ่งช่องเสียงเมื่อแปลงเป็นข้อมูลจะมีขนาด 64 กิโลบิตต่อวินาที การนำข้อมูลเสียงขนาด 64 กิโลบิตต่อวินาทีนี้ไปใช้จำเป็นต้องนำมาบีบอัดก่อน โดยทั่วไปจะเหลือประมาณ 10 กิโลบิตต่อวินาทีต่อช่องสัญญาณเสียงแล้วจึงบรรจุลงในไอพีแพ็กเก็ต เพื่อส่งผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต การสื่อสารผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตต้องมีเราเตอร์ที่ทำหน้าที่พิเศษเพื่อประกันคุณภาพของช่องสัญญาณเพื่อให้ข้อมูลไปถึงปลายทาง หรือกลับมาได้อย่างถูกต้อง และอาจมีการให้สิทธิพิเศษก่อนแพ็กเก็ตไอพีอื่น เพื่อการให้บริการที่ทำให้เสียงมีคุณภาพ นอกจากนี้วีโอไอพียังถูกนิยามให้เป็นความสามารถในการใช้โทรศัพท์ให้ทำทุกอย่างที่เราสามารถทำได้ในปัจจุบันด้วย โครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (PSTN: Public Switched Telephone Network) และส่งสำเนาเอกสารบนเครือข่ายข้อมูลที่มีพื้นฐานอยู่บน

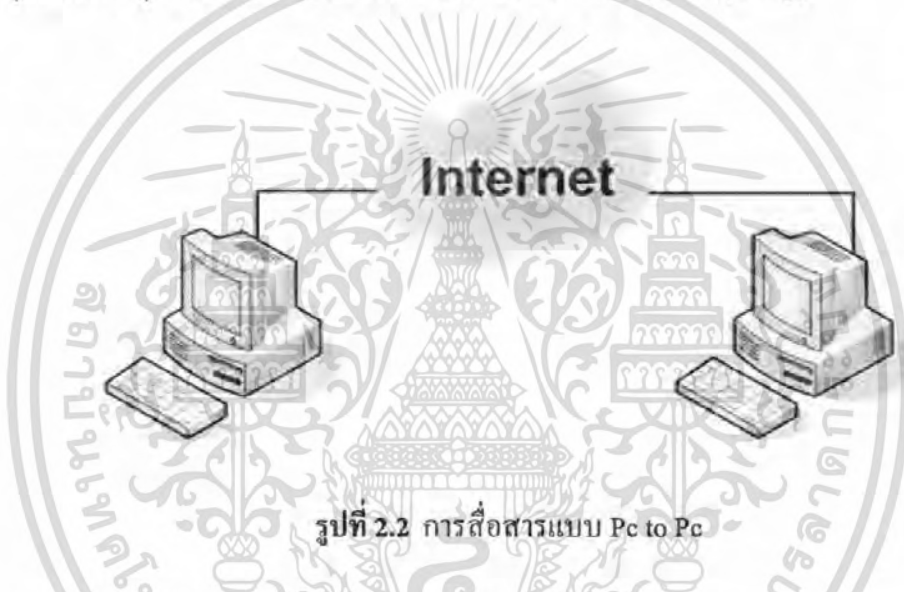
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยการวัดประสิทธิภาพ (QoS:Quality of Service) ของระบบสื่อสารซึ่งแสดงถึงคุณภาพในการส่ง ความสะดวกในการใช้บริการที่เหมาะสม และราคากับผลประโยชน์ที่คุ้มค่า

ระบบการสื่อสารแบบวีโอไอพีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ไปยัง คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC to PC)

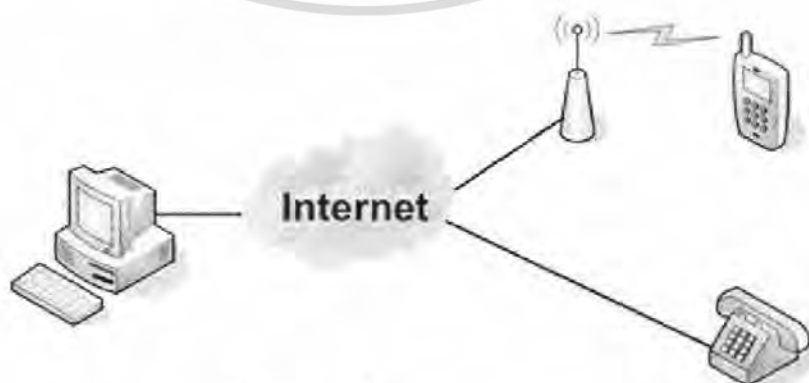
คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล มีการติดตั้งการ์ดเสียง (soundcard) และไมโครโฟน ที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย ไอพี การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลสามารถสื่อสารกันได้แบบจุดต่อจุด หรือแบบจุดต่อหลายจุด โดยอาศัยซอฟต์แวร์ทางด้านโทรศัพท์ไอพี (IP telephony)



รูปที่ 2.2 การสื่อสารแบบ Pc to Pc

2. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ไปยัง โทรศัพท์พื้นฐาน ( PC to Phone )

เป็นการเชื่อมเครือข่าย โทรศัพท์เข้ากับ เครือข่ายไอพีทำให้โดยอาศัย Voice trunks ที่สนับสนุน voice packet ทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลติดต่อกับโทรศัพท์ระบบปกติได้

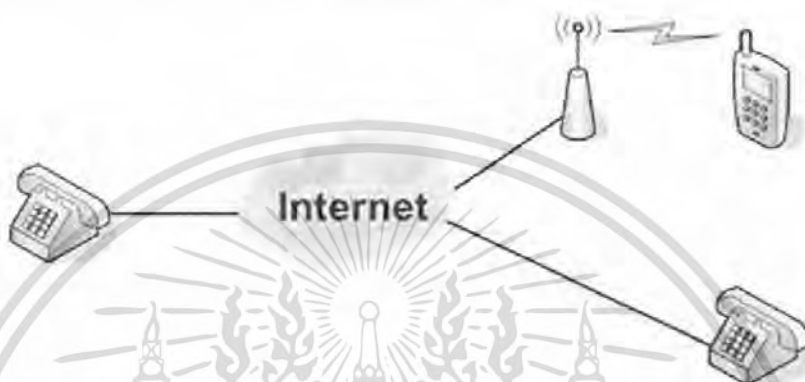


รูปที่ 2.3 การสื่อสารแบบ Pc to Phone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. โทรศัพท์กับโทรศัพท์ ( Telephony )

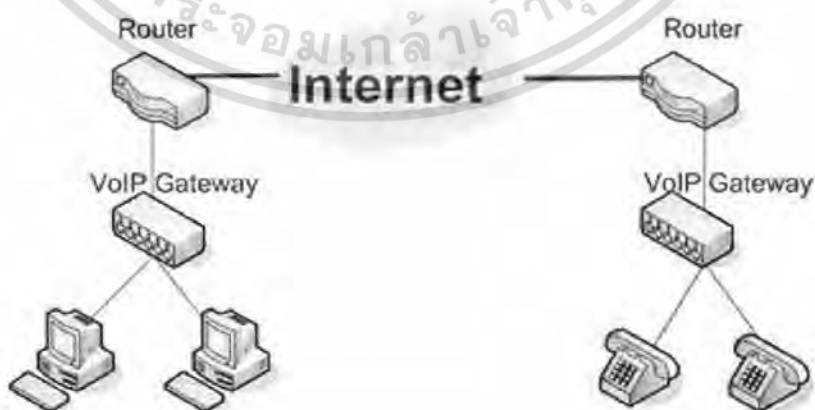
เป็นการใช้โทรศัพท์ธรรมดาติดต่อกับโทรศัพท์ธรรมดา แต่ในกรณีนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนการส่งเสียงบนเครือข่ายไอพีประเภทต่างๆ ซึ่งทั้งหมดติดต่อกันระหว่างชุมสายโทรศัพท์ หรือ การใช้โทรศัพท์ร่วมกับเครือข่ายข้อมูลจำเป็นต้องใช้เกตเวย์ (gateway)



รูปที่ 2.4 การสื่อสารแบบ Phone to Phone

#### 2.1.1 หลักการพื้นฐานของเครือข่ายไอพี

เครือข่ายไอพี (Internet Protocol) มีพัฒนามาจากรากฐานระบบการสื่อสารแบบแพ็กเกต โดยระบบมีการกำหนดที่เรียกว่าไอพีแอดเดรส (IP Address) จากไอพีแอดเดรสหนึ่ง ถ้าต้องการส่งข่าวสารไปยังอีกไอพีแอดเดรสหนึ่ง ใช้หลักการบรรจุข้อมูลใส่ในแพ็กเกต แล้วส่งไปในเครือข่ายระบบการจัดส่งแพ็กเกต กระทำด้วยอุปกรณ์สื่อสารจำพวกเราเตอร์



รูปที่ 2.5 การส่งสัญญาณผ่าน VoIP Gateway

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเห็นว่าการส่งแบบแพ็กเก็ตเข้าไปในเครือข่ายนั้น จะไม่มีการประกันว่าแพ็กเก็ตนั้นจะถึงปลายทางเมื่อไร ดังนั้นรูปแบบของเครือข่ายไอพีจึงไม่เหมาะสมกับการสื่อสารแบบต่อเนื่อง เช่น การส่งสัญญาณเสียง หรือวิดีโอ เมื่อเครือข่ายไอพีกว้างขวางและเชื่อมโยงกันมากขึ้น ความต้องการส่งสัญญาณข้อมูลเสียงที่ได้คุณภาพจึงเกิดขึ้น จึงมีการพัฒนามาเป็นระบบการสื่อสารแบบวีโอไอพี

ข้อมูลในระบบวีโอไอพีต้องส่งผ่านวีโอไอพีเกตเวย์ (VoIP Gateway) ซึ่งหมายถึง การส่งเสียงบนเครือข่ายไอพี เป็นระบบที่แปลงสัญญาณเสียงในรูปของสัญญาณไฟฟ้ามาเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล คือ นำข้อมูลเสียงมาบีบอัดและบรรจุลงแพ็กเก็ตในไอพี แล้วส่งไปโดยมีเราเตอร์เป็นตัวรับสัญญาณแพ็กเก็ตที่ส่งมา และแก้ปัญหาบางอย่างให้ เช่น การบีบอัดสัญญาณเสียง ให้มีขนาดเล็กลง การแก้ปัญหาเมื่อมีบางแพ็กเก็ตสูญหาย หรือ ได้มาล่าช้า (delay) การสื่อสารผ่านทางเครือข่ายไอพีต้องมีเราเตอร์ที่ทำหน้าที่พิเศษเพื่อประกันคุณภาพช่องสัญญาณไอพีนี้ เพื่อให้ข้อมูลไปถึง ปลายทางหรือกลับมาได้อย่างถูกต้อง และอาจมีการให้สิทธิพิเศษก่อนแพ็กเก็ตไอพีอื่น (Quality of Service : QoS) เพื่อการให้บริการที่ทำให้เสียงมีคุณภาพ

นอกจากนั้น Voice over IP (VoIP) ยังเป็นการส่งข้อมูลเสียงแบบ 2 ทางบนระบบเครือข่ายแบบ packet-switched IP network ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสาธารณะ เพื่อสื่อสารระหว่างระบบวีโอไอพีด้วยกัน โดยที่ยังคงความเป็นส่วนตัวไว้ได้ สำหรับการใช้งานเทคโนโลยีวีโอไอพีนั้น จริงๆ แล้วทุกๆ องค์กรสามารถนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้งานได้ แต่สำหรับกลุ่มเป้าหมายที่ตรง และน่าจะได้รับประโยชน์จากการนำเทคโนโลยีวีโอไอพี มาประยุกต์ใช้งานมากที่สุด ได้แก่ กลุ่มธุรกิจขนาดย่อม หรือ SME (Small/Medium Enterprise) รวมถึงกลุ่ม ISP (Internet Service Provider) ต่างๆ สำหรับกลุ่มธุรกิจ SME อาจจะต้องเป็นกลุ่มที่มีระบบเครือข่ายข้อมูลของตนเองอยู่แล้ว ไม่ว่าจะเป็นเครือข่าย Leased Line, Frame Relay, ISDN หรือแม้กระทั่งเครือข่าย E1/T1 ก็ตาม รวมถึงมีระบบผู้สาขาโทรศัพท์ในการใช้งานด้วย การนำเทคโนโลยีวีโอไอพีมาใช้งานนั้นจะทำให้องค์กรลดค่าใช้จ่ายในการใช้งานการสื่อสารสัญญาณเสียงไปได้อย่างมาก และเนื่องด้วยในปัจจุบันการขยายตัวของระบบเครือข่ายสัญญาณข้อมูล หรือ Data Network มีอัตราการเติบโตที่รวดเร็วกว่าการขยายตัวของเครือข่ายสัญญาณเสียงค่อนข้างมาก จึงทำให้มีการนำเทคโนโลยีที่สามารถนำสัญญาณเสียงเหล่านั้นมารวมอยู่บนระบบเครือข่ายของสัญญาณข้อมูลและมีการรับ-ส่งสัญญาณทั้งคู่ได้ในเวลาเดียวกัน เพื่อเป็นการสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ว่าจะเป็นค่าโทรศัพท์ทางไกลต่างจังหวัด หรือรวมถึงค่าโทรศัพท์ทางไกลต่างประเทศด้วย หากองค์กรนั้นมีสาขาอยู่ในต่างประเทศด้วย

## 2.1.2 ความแตกต่างระหว่างระบบสื่อสารแบบวีโอไอพีกับระบบโทรศัพท์พื้นฐานทั่วไป

PSTN ย่อมาจาก Public Switch Telephone Network หรือ เครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน เช่น เครือข่ายของ TOT, TA, หรือ TT&T เป็นเครือข่ายที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายต่างๆ ทั้งในพื้นที่เดียวกัน, ทางไกลต่างจังหวัด, ทางไกลต่างประเทศ และเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน เพื่อจะได้ติดต่อกับโครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐานและโทรศัพท์อื่นๆ ได้

ระบบโทรศัพท์พื้นฐานทั่วไป มีวิวัฒนาการมาจากการใช้การส่งสะท้อนผ่านสายจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โทรศัพท์พื้นฐานทั่วไปจะเป็นการสื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ ผ่านเข้าไปยังชุมสายโทรศัพท์ เพื่อทำการเชื่อมโยงไปยังเลขหมายปลายทาง โดยมีสายไฟเป็นสื่อกลางนั่นเอง เปรียบเสมือนรถไฟที่จะต้องวิ่งจากจุด ๆ หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยอาศัย รางรถไฟเป็นสื่อ แต่สำหรับระบบวีโอไอพีสิ่งหนึ่งที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดที่สุดคือ วีโอไอพีใช้สัญญาณอินเตอร์เน็ตในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล (digital signal) เป็นสื่อในการนำพาข้อมูล (ทั้งภาพและเสียงในเวลาเดียวกัน) ดังนั้นเมื่อนำเอามารวมกันกับอินเตอร์เน็ตความเร็วสูงก็พอจะมองออกกว่าเราสามารถใช้ช่องทางนี้ในการสื่อสารได้ทั้งภาพและเสียงในเวลาเดียวกัน โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการโทรศัพท์ติดต่อแต่ละครั้งหรือไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นรายนาทีเลยทีเดียว ไม่ว่าจะระยะทางไกลแค่ไหนก็ตาม

โทรศัพท์พื้นฐาน	วีโอไอพี
<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นการสื่อสารที่ผ่านสายโทรศัพท์</li> <li>- คิดค่าใช้จ่ายเป็นรายครั้ง และตามระยะเวลาและระยะทาง</li> <li>- สามารถส่งได้เพียงเสียงเท่านั้น</li> <li>- ระบบความปลอดภัยต่ำสามารถดักฟังได้ง่าย</li> <li>- คุณภาพของเสียงขึ้นอยู่กับสายโทรศัพท์</li> <li>- ไม่สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบอื่นได้</li> <li>- จำเป็นต้องใช้ตู้สาขาเพื่อลูกเล่นต่างๆ เช่น ตอบรับอัตโนมัติ โอนสาย ฝากข้อความ ซึ่งมีราคาแพง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นการสื่อสารผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ต</li> <li>- ไม่มีค่าใช้จ่ายในรายครั้งไม่ว่าจะนานเท่าไรหรือไกลเท่าไร</li> <li>- สามารถสื่อสารได้ทั้งภาพและเสียงพร้อมๆกัน(ใช้ โทรศัพท์ที่รองรับภาพได้)</li> <li>- ระบบความปลอดภัยสูงกว่าระบบพื้นฐาน เพราะมีการเข้ารหัสเป็นสัญญาณดิจิทัล</li> <li>- คุณภาพของเสียงขึ้นอยู่กับสัญญาณอินเทอร์เน็ต</li> <li>- สามารถประยุกต์ระบบอื่นที่เกี่ยวกับข้อมูลเพื่อใช้คู่กับระบบได้เช่น การจับภาพเคลื่อนไหว ระบบประชุมผ่านอินเทอร์เน็ต</li> <li>- สามารถเชื่อมต่อเข้ากับตู้สาขาของระบบโทรศัพท์พื้นฐาน เพื่อใช้คุณสมบัติต่างๆ ที่มีอยู่แล้วอีกทั้งยังสามารถเพิ่มเติมระบบต่างๆ เช่นระบบบันทึกเสียง โอนสายตอบรับอัตโนมัติ ด้วยงบประมาณที่ต่ำกว่า</li> </ul>

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระบบโทรศัพท์พื้นฐานเดิมกับระบบวีโอไอพี

### 2.1.3 เทคโนโลยีและการทำงานของวีโอไอพี

มาตรฐานของเทคโนโลยีของวีโอไอพี

สำหรับมาตรฐานที่มีการใช้งานอยู่บนเทคโนโลยีวีโอไอพีนั้น โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 มาตรฐานด้วยกัน ได้แก่ มาตรฐาน H.323 และมาตรฐาน SIP มาตรฐานเหล่านี้ เราสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า “Call Control Technologies” ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับการนำเทคโนโลยีวีโอไอพีมาใช้งาน

### 2.1.3.1 H.323 Standard

สำหรับมาตรฐาน H.323 นั้น จริงๆ แล้วไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับระบบเครือข่ายที่ใช้อินเทอร์เน็ตโปรโตคอล (Internet Protocol ,IP) นอกจากนั้นมาตรฐาน H.323 ยังมีการทำงานที่ค่อนข้างช้า โดยปกติแล้วเราจะเสนอการใช้งานมาตรฐาน H.323 ให้กับลูกค้าก็ต่อเมื่อในระบบเดิมของลูกค้ามีการใช้งานมาตรฐาน H.323 อยู่แล้วเท่านั้น มาตรฐาน H.323 เป็นมาตรฐานภายใต้ ITU-T (International Telecommunications Union) มาตรฐานในตอนแรกนั้น มาตรฐาน H.323 ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเป็นมาตรฐานสำหรับการทำ Multimedia Conferencing บนระบบเครือข่าย LAN เป็นหลัก แต่มาในตอนหลังจึงถูกพัฒนาให้ครอบคลุมถึงการทำงานกับเทคโนโลยีวีโอไอพี ด้วยมาตรฐาน H.323 สามารถรองรับการทำงานได้ทั้งแบบ Point-to-Point Communications และแบบ Multi-Point Conferences อุปกรณ์ต่างๆ จากหลากหลายยี่ห้อที่นั้นสามารถที่จะทำงานร่วมกัน (Inter-Operate) ผ่านมาตรฐาน H.323 ได้

### 2.1.3.2 SIP (Session Initiation Protocol) Standard

มาตรฐาน SIP นั้นถือเป็นมาตรฐานใหม่ในการใช้งานเทคโนโลยีวีโอไอพีโดยที่มาตรฐาน SIP นั้น ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับระบบไอพีโดยเฉพาะ ซึ่งโดยปกติแล้วเราจะแนะนำให้ลูกค้าใหม่ที่จะมีการใช้งานวีโอไอพี ให้มีการใช้งานอยู่บนมาตรฐาน SIP มาตรฐาน SIP นั้นเป็นมาตรฐานภายใต้ IETF Standard ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับการเชื่อมต่อวีโอไอพี มาตรฐาน SIP นั้นจะเป็นมาตรฐาน Application Layer Control Protocol สำหรับการเริ่มต้น (Creating), การปรับเปลี่ยน (Modifying) และการสิ้นสุด (Terminating) ของ Session หรือการติดต่อสื่อสารหนึ่งครั้ง มาตรฐาน SIP จะมีสถาปัตยกรรมการทำงานคล้ายคลึงการทำงานแบบไคลเอนท์-เซิร์ฟเวอร์ (Client-Server Protocol) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ที่ค่อนข้างสูง

### 2.1.3.3 การทำงานของวีโอไอพี

ในส่วนการทำงานของเทคโนโลยีวีโอไอพีนั้นจะมีรูปแบบของไอพีโปรโตคอล ดังนี้ อินเทอร์เน็ตโปรโตคอล หรือ ไอพี จะเป็นโปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลในระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งในส่วนของการทำงานคร่าวๆ ของโปรโตคอลไอพี นี้สามารถสรุปอย่างย่อได้ดังต่อไปนี้

- ข้อมูลจะถูกแบ่งย่อยออกเป็นส่วนๆ
- แต่ละส่วนของข้อมูลจะถูกส่งออกไปในเส้นทางที่แตกต่างกันบนระบบอินเทอร์เน็ต
- ข้อมูลย่อยแต่ละส่วนนั้นจะไปถึงยังปลายทางในเวลาและลำดับที่ไม่พร้อมเพรียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลังจากนั้นจะมีโปรโตคอลอีกหนึ่งตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง คือ Transmission Control Protocol (TCP) ซึ่ง TCP นี้จะเข้ามาช่วยเกี่ยวกับการเรียงลำดับข้อมูลที่มาถึงยังปลายทางนี้ให้อยู่ในลำดับและรูปแบบที่ถูกต้องเหมือนข้อมูลต้นแบบก่อนที่จะถูกส่งออกมา
- โปรโตคอลไอพีนี้จะ เป็นโปรโตคอลในการสื่อสารแบบคอนเน็คชั่นเลส (Connectionless Protocol) ซึ่งเป็นการสื่อสารที่จุดต้นทางและปลายทางของการสื่อสารไม่จำเป็นต้องสร้างการเชื่อมต่อ (Connection) ขึ้นมา ณ เวลาที่ต้องการทำการสื่อสาร

หลังจากได้ทราบคร่าวๆ เกี่ยวกับ โปรโตคอล ไอพีกัน ไปแล้ว เราก็จะมาคุยกันถึงกระบวนการทำงานของเทคโนโลยี ไอโอทีกัน ซึ่งมีขั้นตอนอยู่ดังนี้

- แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

ในขั้นตอนแรกจะเป็นการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้ไปอยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล หรือที่เรียกว่า PCM (Pulse Code Modulation)

- ลดสัญญาณสะท้อน

0110111000101001000101011011001001101001001011

## Removal of Echo

รูปที่ 2.7 การลดสัญญาณสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการมีการแยกสัญญาณออกเป็นส่วนๆ เพื่อทำการตัดสัญญาณสะท้อนออก ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกจัดการ โดย DSP (Digital Signal Processors)

- จัดรูปแบบเฟรม

0110111000101001000101011011001001101001001

### Framing Process

รูปที่ 2.8 การจัดเฟรม

ในส่วนของสัญญาณที่เหลือนั้น ก็จะถูกแบ่งและจัดรูปแบบขึ้นมาใหม่ในรูปของเฟรม ซึ่งกระบวนการนี้จะถูกจัดการ โดยรูปแบบการบีบอัดที่เรียกว่า CODEC หลังจากกระบวนการนี้แล้วเฟรมของสัญญาณ เสียงจะถูกสร้างขึ้น

- จัดรูปแบบแพ็กเกต

RTP 0110111000101001000101011011001001101001001

### Packetisation Process

รูปที่ 2.9 การจัดแพ็กเกต

ในกระบวนการนี้จะเป็นการแปลงเฟรมของสัญญาณให้มาอยู่ในรูปของแพ็กเกตซึ่งจะมีการเพิ่มเฮดเดอร์เข้าไปในแพ็กเกต หลังจากนั้นแพ็กเกตนี้จะถูกส่งต่อไปที่ Host Processor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใส่งานไอพีแอดเดรสที่ต้องการส่งลงไปแพ็กเก็ต

IP | UDP | RTP | 0110111000101001000101011011001001101001001

## Address and Delivery

### รูปที่ 2.10 การใส่งานไอพีปลายทาง

หลังจากที่ได้แปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของแพ็กเก็ต แล้ว ข้อมูลนั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์และใส่งานไอพีแอดเดรสปลายทาง

- แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก

011011100010100100010101101

### Conversion to Analog

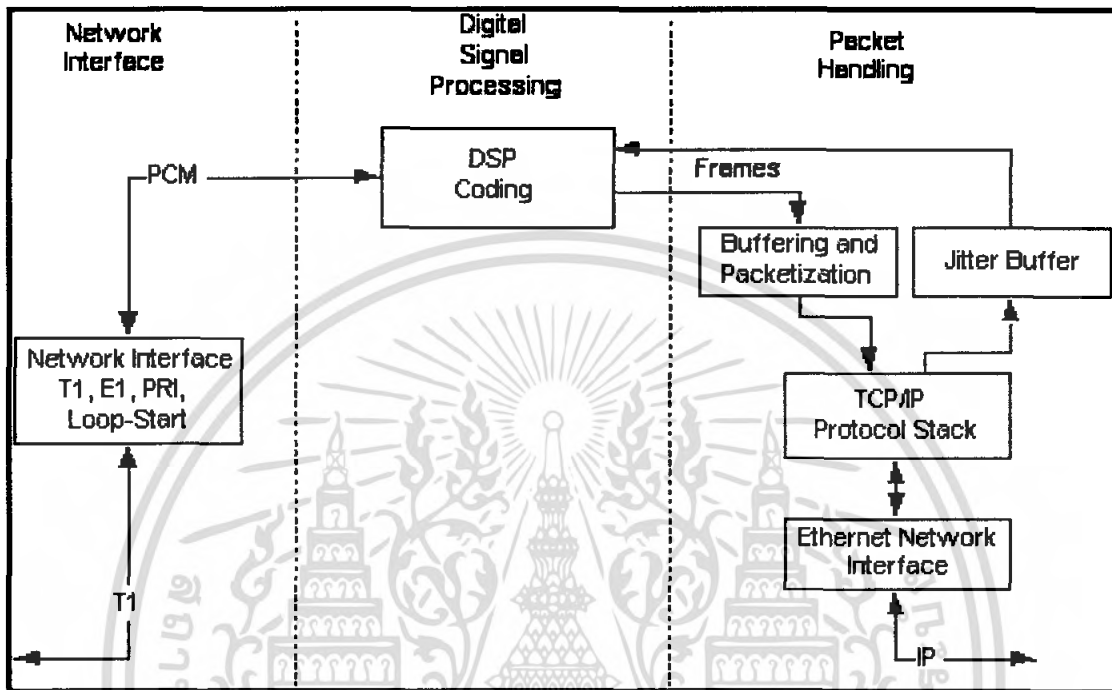
### รูปที่ 2.11 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

หลังจากที่ได้ทำการใส่งานของไอพีแอดเดรสปลายทางไปในเสกเตอร์ของแพ็กเก็ตแล้วนั้น เมื่อแพ็กเก็ตเหล่านั้นไปถึงด้านปลายทาง ข้อมูลในเสกเตอร์เหล่านั้นจะถูกแยกออกเพื่อให้เหลือแค่ Voice Frame หลังจากนั้นก็จะทำการแปลงสัญญาณดิจิทัล (Digital PCM) ให้กลับมาเป็นสัญญาณรูปแบบอนาล็อก ที่เป็นสัญญาณเสียงที่เราได้ยินกันอีกครั้งหนึ่ง

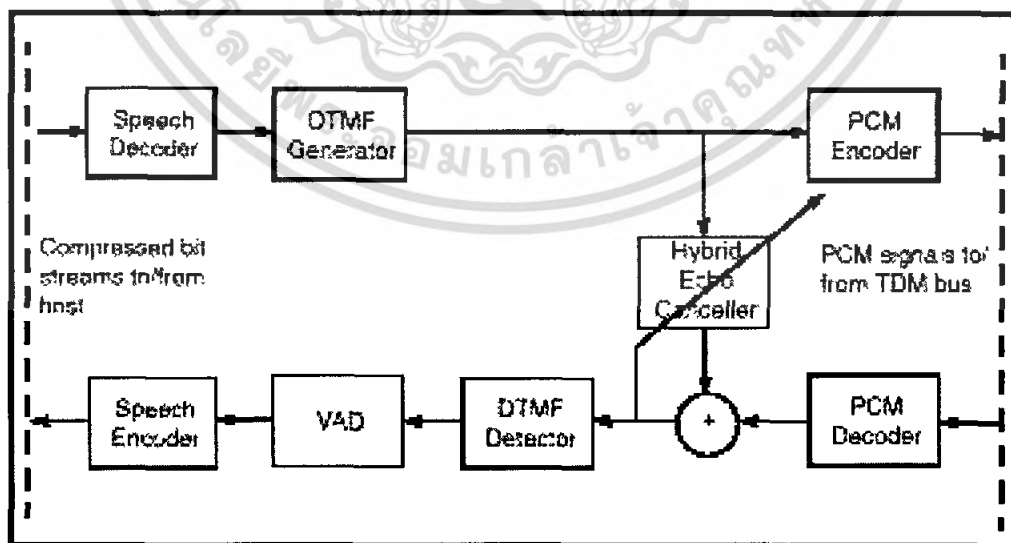
- การตรวจสอบความผิดพลาด

กระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการที่ใช้ในการตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดซึ่งอาจจะเกิดขึ้นระหว่างการส่งสัญญาณและนำมาซึ่งความผิดพลาดหรือความเสียหายของสัญญาณจนทำให้เราไม่สามารถทำการสื่อสารอย่างถูกต้องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 Block diagram ของ Voice Processing Module



รูปที่ 2.13 โครงสร้างภายในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 ส่วนจัดการการสื่อสาร (The Call Processing module)

ทำหน้าที่เป็นตัวจัดการสัญญาณเข้าออก (signaling gateway) ขอมให้มีการสร้างการสื่อสารผ่านเครือข่ายแพ็กเกต ส่วนจัดการการสื่อสารจะตรวจจับสัญญาณเรียกใหม่ที่เกิดขึ้น และเก็บข้อมูลเกี่ยวกับที่อยู่ ทำงานอ้างอิงตาม protocol H.323 มีฟังก์ชันที่ต้องปฏิบัติดังนี้

1. ตรวจสอบ อินเทอร์เฟซ (Interface) ที่ต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์เพื่อรับคำสั่งและผลตอบที่จะเข้ามา
  2. แยกข่าวสารออกมา และสิ้นสุดขั้นตอนการเข้าสัญญาณ (terminate signaling protocols)
  - 3 จัดการกับข่าวสารให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถเปิดการประชุม (session) ผ่านเครือข่ายแพ็กเกต
- แปลงเบอร์โทรศัพท์เป็นไอพีแอดเดรสขั้นตอนการหมุนเรียก (dialing) มี 2 วิธีคือ
- single stage หมุนเรียกเบอร์ของปลายทาง และ ใช้วิธีเลือกเส้นทางแบบอัตโนมัติ
  - two stage หมุนเรียกเบอร์ของวิโอไอพีเกตเวย์ก่อน แล้วหมุนเรียกปลายทางจริง

#### 2.1.5 Packet Processing module

เป็นขั้นตอนการบรรจุสัญญาณข้อมูลเสียงลงในแพ็กเกต โดยเพิ่ม transport headers ก่อนส่งแพ็กเกต ผ่านเครือข่ายไอพี (หรือเครือข่าย แพ็กเกต อื่นๆ) แปลงข่าวสารของสัญญาณจาก telephony protocol เป็น packet signaling protocol

วิโอไอพีทำงานโดยอาศัยโพรโตคอลที่ชื่อว่า H.323 ซึ่งเป็นชุดของมาตรฐานที่เกี่ยวข้องหลายเรื่องรวมกัน โดยครอบคลุมทั้งการสื่อสารแบบ จุดต่อจุด และหลายจุดพร้อมๆกัน

- เทอร์มินอล (Terminal) คือ โคลเอนท์หรือจุดที่ข้อมูล H.323 ถูกสร้างหรือขึ้น หรือสิ้นสุดการเดินทาง ซึ่งอาจจะเป็นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือว่า เครื่องโทรศัพท์ที่สนับสนุน เครือข่าย ไอพีซึ่งอาจจะสนับสนุนสัญญาณวีดีโอด้วยก็ได้

- เกตเวย์ (Gateway) ใช้สำหรับเชื่อมต่อเครือข่ายที่ต่างชนิดกัน เพื่อทำการแปลงชนิดของข้อมูลให้เข้ากันได้กับเครือข่ายที่จะเชื่อมต่อ

- เกตคีปเปอร์ (Gatekeeper) เป็นตัวช่วยบริการต่างๆในแต่ละฝั่งของเครือข่าย ซึ่งมีหน้าที่ในการแปลงแอดเดรสระหว่างหมายเลขโทรศัพท์ กับหมายเลขไอพี จำกัดการใช้งานของแต่ละเทอร์มินอลบริหารแบนวิดท์และจัดการเกี่ยวกับการหาเส้นทางให้กับแพ็กเกต

### 2.1.5.1 องค์ประกอบของ H.323

- Audio Codec

- G.711 PCM สำหรับย่านความถี่เสียงพูด
- G.722 7kHz audio coding ที่ 64kb/s
- G.723.1 dual rate speech coders สำหรับส่งข้อมูล multimedia ที่ 5.3 และ 6.3 kb/s
- G.728 Coding สำหรับเสียงพูดที่ 16 kb/s ใช้ Linear prediction
- G.729 Coding สำหรับเสียงพูดที่ 16 kb/s ใช้ conjugate-structure algebraic code excite linear prediction

- Control

- H.245 กำหนด message ที่ใช้เปิด channel ของ media stream รวมไปถึงคำสั่ง (command), คำขอร้อง(request), และสัญญาณบอกสถานะ(indication) อื่นๆ
- H.225.0 กำหนด message ที่ใช้ควบคุมการเรียก หรือ ขอดัดต่อไปยังอีกฝ่ายหนึ่ง (call control) รวมทั้งสัญญาณที่ใช้ (signaling), การตอบรับ (registration และ admission) รวมทั้งการแบ่ง Packet และควบคุมจังหวะการทำงานให้ตรงกัน ของ ข้อมูลที่ส่ง (packetization/synchronization of media stream)

- Real time transport

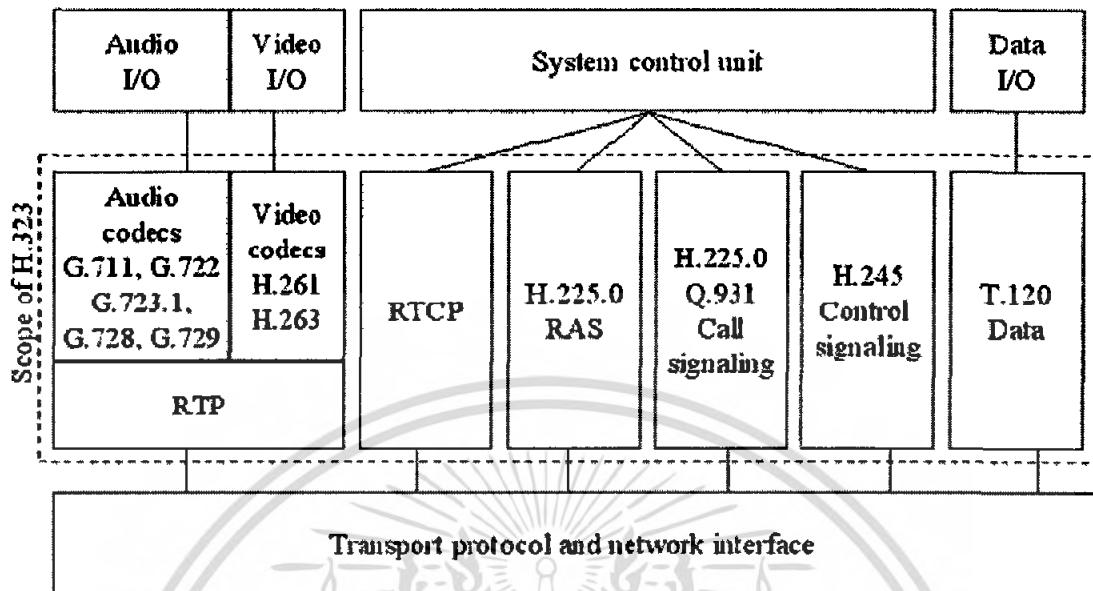
- RTP/RTCP คือ IETF RFC1889 ใช้สำหรับส่งข้อมูลเวลาจริง

- Security

- H.235 กำหนดแนวทางของระบบรักษาความปลอดภัย การ Encryptions ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในระบบ H.323 ทั้งหมด

### 2.1.5.2 ลำดับชั้นของ H.323 Terminal

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.14 ลำดับชั้นของ H.323

### 2.2 การกำจัดสัญญาณสะท้อน

เสียงสะท้อนคือการซ้ำของคลื่นสัญญาณทำให้ลักษณะของคลื่นนั้นเปลี่ยนแปลงไป ในการสื่อสาร สัญญาณสะท้อนทำให้คุณภาพในการบริการลดลง การลดสัญญาณสะท้อนนั้นสำคัญมากในระบบการสื่อสารในการพัฒนา การวัดสัญญาณสะท้อนเริ่มขึ้นในปี 1950 และพัฒนาต่อมา จนทุกวันนี้ได้มี นวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นมาเช่น เครื่องข่ายโทรศัพท์ไร้สาย เครื่องข่ายอินเทอร์เน็ต และการประชุมผ่านเครือข่าย (Teleconference) ทุกอย่างต้องการมีการจัดการกับสัญญาณสะท้อน

ระบบการสื่อสารมีเสียงสะท้อนอยู่สองชนิด คือ สัญญาณสะท้อนทางเสียง (Acoustic Echo) และ สัญญาณสะท้อนทางไฟฟ้า (Electric Echo) เป็นผลที่ได้จากการโต้ตอบระหว่างลำโพงและไมโครโฟน, โทรศัพท์ไร้สาย, การประชุมผ่านเครือข่าย หรือ เครื่องช่วยฟัง สัญญาณสะท้อนทางเสียงอาจถูกสะท้อนจากกลุ่มของความแตกต่างระดับผิวเฝิน เช่น กำแพง, เพดาน, ชั้น และ การเดินทางหลายช่องทาง

สัญญาณสะท้อนในสายโทรศัพท์เป็นผลจากความต้านต่อไฟฟ้าที่ไม่เข้ากันของการสับเปลี่ยนโทรศัพท์สองแบบจากผู้ใช้ 2-สาย ติดต่อกับ 4-สาย ผลลัพธ์ของเสียงสะท้อนขึ้นอยู่กับความถี่ของเวลาระหว่างเหตุการณ์และคลื่นสะท้อน, กำลังของคลื่นสะท้อนและจำนวนของช่องทางซึ่งเป็นคลื่นที่ถูกสะท้อน สัญญาณสะท้อนในสายโทรศัพท์และ สัญญาณสะท้อนทางเสียง

เป็นเสียงสะท้อนในการประชุมผ่านเครือข่ายและเครื่องช่วยฟังซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและก่อให้เกิดความรำคาญอีกทั้งสามารถส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงได้

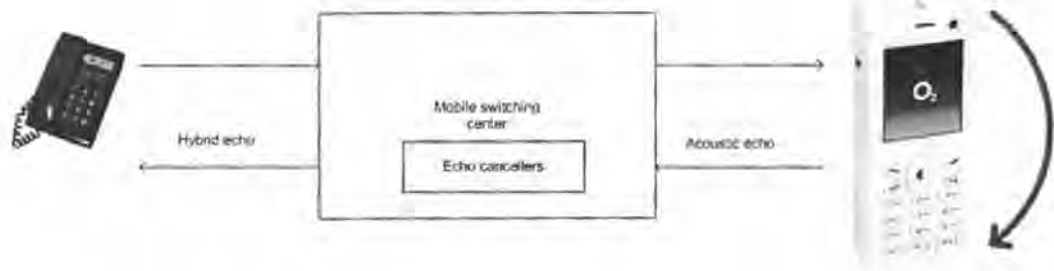
เสียงสะท้อนคือการสะท้อนของสัญญาณจากจุดหรือพื้นผิวที่อยู่ในลักษณะผ่านสื่อกลางซึ่งเปลี่ยนสัญญาณการถ่ายทอด เสียงสะท้อนถูกใช้บ่อยๆ สำหรับการค้นคว้า, การสำรวจ และการเดินเรือ วัตถุประสงค์ในการค้นคว้าทางอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องมือในการสะท้อนภาพเช่น เครื่องโซนาร์ (Sonar), สะท้อนภาพ เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic), สะท้อนอินฟราเรด (Infrared) และเรดาร์ (radar) และในสัตว์บางชนิดเช่น ค้างคาว, และปลาโลมา

ในการสื่อสารเสียงสะท้อนจะมีประสิทธิภาพอย่างมากในลักษณะของเสียงสนทนาในโทรศัพท์, การประชุมผ่านเครือข่ายหรือระบบการสื่อสารในเครื่องบิน เสียงสะท้อนขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวของมันเองและการถ่วงเวลา โดยทั่วไปจะสังเกตการณ์ขยายตัวได้และการถ่วงที่มากกว่า 1 ms สามารถเห็นได้ชัด โดยมีข้อแม้ว่าในรอบการถ่วงของสัญญาณ เสียงสะท้อนจะอยู่ที่ 2-3 ms เสียงสะท้อนทำให้เกิดเสียงสะท้อนในขณะที่สื่อสารกัน อย่างไรก็ตามเสียงสะท้อนก่อให้เกิดความรำคาญและไม่เป็นที่ต้องการ ในรอบการหน่วงเวลาและการขยาย ในส่วนพิเศษที่มากกว่า 20 ms หน่วงเวลา 200 ms ขึ้นไปเสียงสะท้อนอาจเด่นเป็นในการสื่อสาร

การยกเลิกเสียงสะท้อนเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบของระบบสื่อสารสมัยใหม่เช่น การประชุมทางโทรศัพท์, โทรศัพท์ไร้สาย, มือถือ, การประชุมผ่านเครือข่ายและระบบการสื่อสารในห้องบังคับเครื่องบิน เสียงสะท้อนทั้งสองชนิดนี้ดูได้ดังรูป 2.15

- (1) สัญญาณสะท้อนทางเสียงเป็นตัวเชื่อมระหว่างลำโพงและไมโครโฟนในโทรศัพท์ไร้สาย, มือถือ และระบบการประชุมผ่านเครือข่าย
- (2) สัญญาณสะท้อนทางไฟฟ้า เกิดขึ้นจากการไม่เข้ากันของวงจรที่ติดต่อกัน 2 สาย และ 4-สาย ในการสับเปลี่ยนเครือข่ายโทรศัพท์

เสียงสะท้อนที่เกิดในวงจรโทรศัพท์เป็นส่วนใหญ่อะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ติดต่อกันระหว่าง 2-สาย และ 4-สาย ของโทรศัพท์สายหลัก ในทุกวันที่ในเครือข่ายขยายตัวมากขึ้น ราคาของสายแบบ 4-สาย นั้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงเปลี่ยนจาก 4-สาย เป็น 2-สาย ผสม 2/4-สาย ที่ตัวรับเนื่องจากความไม่สมดุลของวงจรผสม 4/2-สาย จึงเกิดการสะท้อนกลับในการส่งและทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนนั่นเอง ถ้ามีเสียงสะท้อนมากกว่า 1 ms นั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนทำให้เกิดความรำคาญและเกิดการแทรกของสัญญาณ

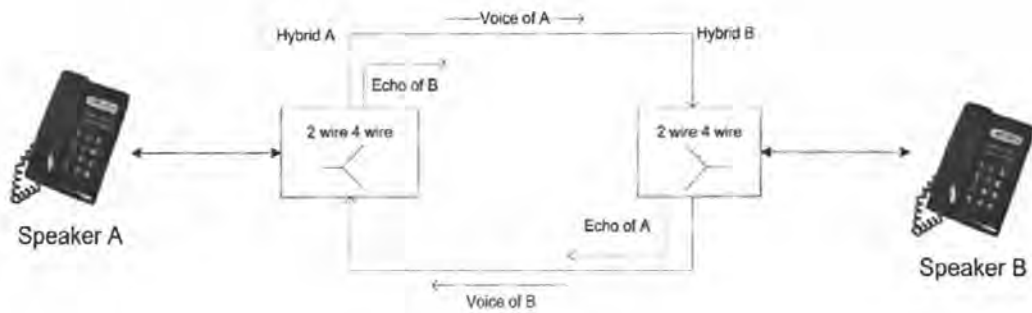


รูปที่ 2.15 แสดงสัญญาณสะท้อนในระบบโทรศัพท์

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นสัญญาณสะท้อนจะเกิดจากไมโครโฟนและหูฟังนั้นเหนือขวามือกันในระบบโทรศัพท์มือถือ นั้น สัญญาณเดียวทำงานสองตำแหน่งในเครือข่าย จุดแรกคือจุดที่ถอดรหัสเสียงในหูฟังเปลี่ยนสัญญาณพูดให้เป็นสัญญาณดิจิทัล แบ่งเฟรม, บีบอัด, ถอดรหัสและมอดูเลต จากนั้นสัญญาณคลื่นวิทยุก็จะติดต่อกับเครือข่าย กำหนดวงเวลาทั้งหมดจะได้อาจมาจากสัญญาณดิจิทัลที่ 80-100 ms ผลรวมในรอบการหน่วงเวลาอยู่ที่ 160-200 ms สำหรับสัญญาณสะท้อนอื่นๆ ค่าความหน่วงเวลาจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัญญาณสะท้อนในการสื่อสาร เนื่องจากในการทำงานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มีค่าความหน่วงเวลาอยู่แล้ว จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดสัญญาณสะท้อนออกไป

### 2.2.1 สัญญาณสะท้อนในสายโทรศัพท์

สัญญาณสะท้อนโดยทั่วไปเกิดขึ้นจากเครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (Public-Switched Telephone Network PSTN) สัญญาณสะท้อนสายโทรศัพท์นั้นเกิดการสะท้อนของสัญญาณพูดที่ตำแหน่งของวงจรไม่เข้ากัน รูปแบบคือสายโทรศัพท์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนจาก 2-สาย จะต้องต่อกับ 4-สาย ดังรูปที่ 2.17 จะแสดงให้เห็นพื้นฐานของวงจรคือ มี 3 ช่องทางในวงจรจะแบ่งเป็น ตัวส่ง, ตัวรับสัญญาณของสายคู่ดังกล่าว และวงจรแปลงสัญญาณ ซึ่งวงจรที่สมบูรณ์จะไม่มีสัญญาณสะท้อน อย่างไรก็ตามการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณมักจะไม่มีสมบูรณ์ทำให้มีโอกาสเกิดสัญญาณสะท้อนได้มาก



รูปที่ 2.16 แสดงการสื่อสาร โทรศัพท์แบบ 2-สาย และ 4-สาย

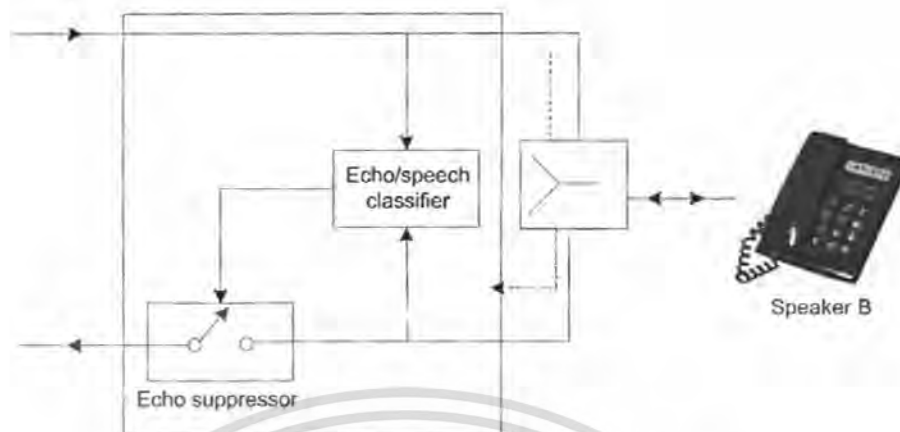


รูปที่ 2.17 แสดงการติดต่อของวงจร 2-สายถึง 4-สาย

### 2.2.1.1 การลดสัญญาณสะท้อน

ในการพัฒนาการลดสัญญาณสะท้อนเริ่มขึ้นในปี 1950 ในการลดสัญญาณสะท้อน อันดับแรกที่สำคัญที่สุดคือการจัดการที่วงจรดาวเทียม ดังแสดงรูป 2.18 คือ การกำกับของ สวิตช์ ที่รับสัญญาณพูดและทำให้สัญญาณสะท้อนลดลง ช่วงเวลาที่พูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงระบบการลดสัญญาณสะท้อน

การควบคุมสัญญาณสะท้อนนั้นจะควบคุมจากการตรวจจับเสียงพูดกับเสียงสะท้อนตัวตรวจจับสัญญาณสะท้อน จะระดับของสัญญาณที่เข้ามาใหม่และสัญญาณที่ออกไปและตัดสินใจว่า สัญญาณมาจากการพูดจากผู้พูด B ไปฝั่งผู้พูด A คือเสียงพูดจาก B ถึง A หรือสัญญาณสะท้อน A ตัวจับสัญญาณสะท้อนตรวจพบก็จะทำการเกิดสัญญาณสะท้อนให้ต่ำลงดังแสดงให้เห็นระหว่างผู้พูด A กับผู้พูด B

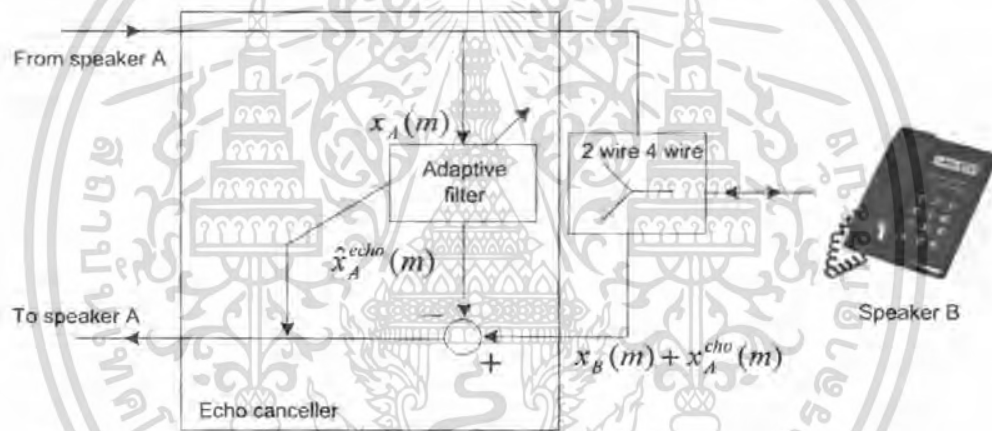
ผลงานของตัวตรวจจับสัญญาณสะท้อนจะมีความถูกต้องแม่นยำระหว่างเสียงพูดกับสัญญาณสะท้อนในการแยกทั้งสองสิ่งในระบบ สัญญาณสะท้อนในเสียงพูดจะมีอยู่น้อยกว่าสัญญาณพูดแต่ก็อย่างหนึ่งคือมีลักษณะคล้ายกับแถบแยกสีและอาศัยสถิติของเสียงพูดดังนั้นพื้นฐานในการแยกเสียงพูดออกจากเสียงสะท้อนคือที่ระดับของสัญญาณ เสียงพูดและสัญญาณสะท้อนอาจจะผิดระดับขึ้นและมีระดับที่สูงหรือทำให้สัญญาณสะท้อนลดลง สำหรับวงจรพื้นฐานตัวลดสัญญาณสะท้อนสามารถออกแบบให้รับการตัดสินใจที่ผิดและแสดงผลงานที่ดี ผลของตัวลดสัญญาณสะท้อนขึ้นอยู่กับค่าหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อน โดยทั่วไปตัวลดจะทำงานเมื่อถึงรอบการหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนจะมีน้อยเพียง 100 ms เมื่อการติดต่อในระยะใกล้ๆ ของควาเทียมรอบการหน่วงเวลาอาจจะมีมากถึง 600 ms ถ้าการสื่อสารที่ใช้เวลานานอาจเปลี่ยนรูปแบบการสื่อสารและผลที่ออกมาสำคัญมากขึ้นใน เสียงพูดและสัญญาณสะท้อนอาจทำให้การแบ่งทั้งสองอย่างมีผิดพลาดได้เมื่อมีการหน่วงเวลาที่ยาวนาน ตัวลดสัญญาณสะท้อนอาจทำให้การแบ่งทั้งสองอย่างที่มีผิดพลาดได้เมื่อมีการหน่วงเวลาที่ยาวนาน ตัวลดสัญญาณสะท้อนต่อความผิดพลาดต้องเป็นที่น่าสนใจและพอที่เปลี่ยนแปลงได้แบบจำลองตัวปรับเสียง ระบบที่ใช้ได้ระยะสั้นและระยะยาวคือระบบตัวกรองสัญญาณสะท้อนปรับค่าได้ (Adaptive echo canceller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.2 ตัวกรองในการลดสัญญาณสะท้อน (Adaptive echo canceller)

การกำจัดสัญญาณสะท้อนพัฒนาขึ้นในปี 1960 โดยสถาบัน AT&T Bell Laboratories และ Comsat Telesystem โดยเริ่มกำจัดสัญญาณสะท้อนโดยการทำการทดลองผ่านการสื่อสารเครือข่ายดาวเทียมพิสูจน์ว่าเครือข่ายสมบรูณ์สำหรับระยะใกล้ๆ

รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานของตัวกรองสัญญาณสะท้อนเพื่อกำจัดสัญญาณสะท้อน สัญญาณเสียงพูดบนผู้พูด A พูดกับผู้พูด B คือ สัญญาณเข้าที่ 4/2-สาย B และไปถึงตัวกำจัดลักษณะสะท้อนโดยตัวตรวจสัญญาณสะท้อนจาก B ถึง A เพื่อจับสัญญาณสะท้อนและสร้างรูปแบบจำลองเสียงสะท้อนที่จุด A แบบจำลองนี้ใช้แทนการลดสัญญาณสะท้อนที่จุดผู้พูด A บนสาย B



รูปที่ 2.19 แสดงระบบการปรับค่าของการลดสัญญาณสะท้อน

วงจรนี้จะมีตัวเลขของแต่ละค่าทั้งหมดจะมีความยาวไม่เหมือนกันและมีลักษณะความต้านทานต่างกัน ดังนั้นมันจึงเป็นไปได้เลยที่วงจรจะสมบรูณ์เมื่อวงจรให้สมบรูณ์ทาง 4-สาย ก็จะมีวนกลับมาในวงจรอีกจึงเกิดสัญญาณสะท้อนขึ้น

### 2.2.1.3 ความหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนในเครือข่ายโทรศัพท์

ความหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนคือระบบของเวลาของสัญญาณที่ส่งกลับมา ค่าความหน่วงเวลาจากฝั่งผู้รับถึงฝั่งผู้ส่ง คือ ผลรวมของการหน่วงเวลาที่ต้องการของเสียงพูดหนึ่ง ผ่านไปถึงค่าเครือข่ายและติดต่อเครือข่ายของผู้ฟัง รอบการหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนคือ ระยะเวลาที่ส่งสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับแล้วย้อนกลับมาที่ตัวรับอีกครั้งหนึ่ง ถือเป็น 1 รอบเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่นเมื่อส่งระยะไกลๆ โดยผ่านทางโทรศัพท์มือถือและดาวเทียมรอบในการหน่วงเวลามีเยอะมากบางครั้งอาจมากถึง 600 ms และอาจเกิดสัญญาณสะท้อนนั้นดังนั้นจึงต้องมีตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนขึ้นเพราะมีความจำเป็นอย่างมาก

แหล่งกำเนิดของความหน่วงเวลาใน PSTN มีดังนี้

- ความหน่วงเวลาของเสียงพูด d.s-40 ms
- ระหว่างการทำงานของ hand-off delay ประมาณ 10 ms
- ความหน่วงเวลาของตัวส่งประมาณ 1 ms ต่อ 100 ไมล์ของสายเคเบิล
- ดาวเทียม 250-300 ms
- voice-over IP (VOIP) 50-100 ms

#### 2.2.1.4 ค่าความสูญเสียของสัญญาณสะท้อน

คือจำนวนความสูญเสียที่เกิดจากสัญญาณสะท้อน (ERI) สามารถหาได้จาก

$$ER2 = 10 \log_{10} (\text{พลังงานในการส่ง} / \text{พลังงานของสัญญาณสะท้อน}) \text{dB}$$

ถ้าค่าสัญญาณสะท้อนที่ได้นั้นสูงคือค่า ERL จะต่ำแต่ถ้าสัญญาณสะท้อนต่ำค่า ERL จะสูง

การกำจัดสัญญาณสะท้อนพื้นฐานจะใช้สมการตัวกรองชั้นเดียว โดยตัวเลขสัมประสิทธิ์ของกรองคือตัวปรับค่าพลังงานของสัญญาณบนสายที่น้อยที่สุด การกำจัดสัญญาณสะท้อนนั้นการหาค่าตอบสนองนั้นอาจไม่มีที่สิ้นสุดหรือมีการตอบสนองที่ค่ากรองข้อได้เปรียบของตัวกรองแบบ IIR คือ สามารถสังเคราะห์สัญญาณสะท้อนการหน่วงเวลานานได้ผ่านตัวเลขว่อก่อนข้างน้อยของสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง ในการปฏิบัติพื้นฐานการกำจัดสัญญาณสะท้อนใช้ตัวกรองแบบ FIR ซึ่งเป็นตัวที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานตั้งแต่เมื่อนำมาใช้งานก็มีอุปสรรคอยู่ข้างเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบและความคงทนต่อการทำงานของตัวกรองแบบ IIR

สมมติให้สัญญาณบนสายจากผู้พูด B ถึงผู้พูด A  $V_B(m)$  เท่ากับสัญญาณพูดของ B  $x_B(m)$  บวกกับสัญญาณสะท้อนของเสียงพูด A  $x_A^{echo}(m)$  จะได้

$$y_B(m) = x_B(m) + x_A^{echo}(m) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติเสียงพูดและเสียงสัญญาณสะท้อนจะไม่แสดงบนสายโทรศัพท์พร้อมๆ กัน นอกเสียจากว่าทั้งสองเสียงจะเกิดออกมาพร้อมกัน ที่ตำแหน่งต่ำกว่าสามารถทำให้ง่ายโดยการปรับการทำงานของมัน สมมุติให้ตัดสายของการตอบสนองของสัญญาณสะท้อนทางแบบจำลองผ่านตัวกรองแบบ FIR ผลที่ออกมาได้จากการประเมินค่าสัญญาณสะท้อนสามารถเห็นได้ชัดเจนดังสมการ

$$\hat{x}_A^{echo}(m) = \sum_{k=0}^P h_k(m)x_A(m-k) \quad (2.2)$$

ที่  $h_k(m)$  คือ เวลาผันแปรเป็นสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง FIR แบบจำลองของสัญญาณสะท้อนและ  $\hat{X}_A^{echo}(m)$  คือ ค่าประเมินเสียงพูด A บนสายจากผู้พูด B ถึงผู้พูด B ด้านสัญญาณสะท้อนที่เหลือหรือค่าผิดพลาดหลักการเอาสัญญาณสะท้อนออกโดยผ่าน

$$\begin{aligned} e(m) &= y_B(m) - \hat{x}_A^{echo}(m) \\ &= x_B(m) + x_A^{echo}(m) - \sum_{k=0}^P h_k(m)x_A(m-k) \end{aligned} \quad (2.3)$$

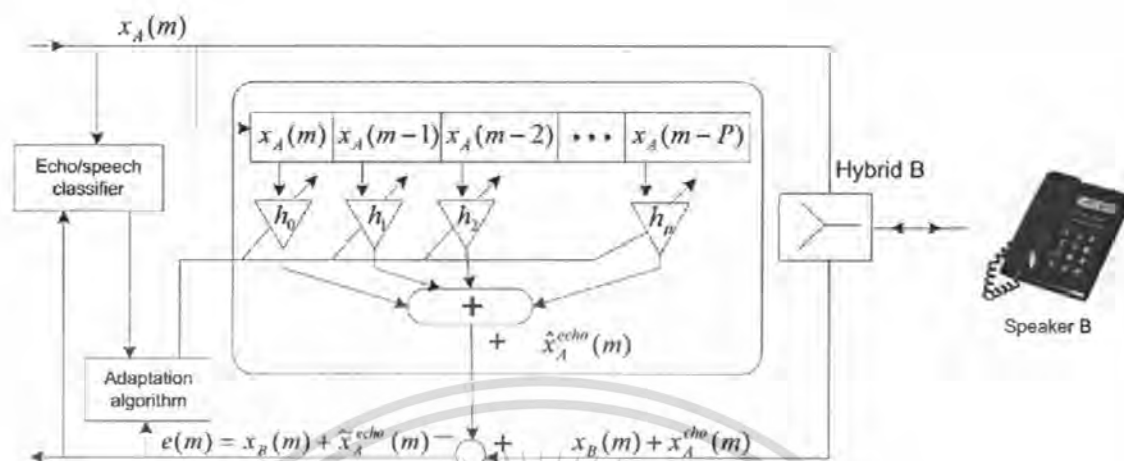
สำหรับช่วงเวลาทันทีทันใดเมื่อผู้พูด A คือ ผู้พูดและผู้พูด B คือ ผู้ฟังและเงียบ จะเกิดสัญญาณสะท้อนตลอดแสดงจากสาย B ถึง A จะได้

$$\begin{aligned} e(m) &= \hat{x}_A^{echo}(m) = x_A^{echo}(m) - \hat{x}_A^{echo}(m) \\ &= x_A^{echo}(m) - \sum_{k=0}^P h_k \end{aligned} \quad (2.4)$$

ที่  $\hat{X}_A^{echo}(m)$  คือ ส่วนที่เหลือของสัญญาณสะท้อน การกำจัดสัญญาณสะท้อนใช้ตัวกรองแบบ FIR กำจัดดังแสดงรูปที่ 2.20 จำนวนของสัญญาณสะท้อนส่วนที่เหลือขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวกำจัดเสียงสะท้อนการสังเคราะห์รูปแบบจำลองของสัญญาณสะท้อนและการสะท้อนกลับขึ้นอยู่กับวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์

### 2.2.1.5 รูปแบบในการปรับค่ากำจัดสัญญาณสะท้อน

สัมประสิทธิ์ของสัญญาณสะท้อน  $h_k(m)$ , คือ ปรับค่าสัญญาณสะท้อนให้น้อยที่สุดบนสาย



รูปที่ 2.20 แสดงการลดสัญญาณสะท้อนโดยใช้ตัวกรองปรับค่าได้แบบ FIR

โทรศัพท์ที่เสียงจากผู้พูด B ถึง ผู้พูด A สมมติให้เป็นสัญญาณ  $X_A(m)$  และ  $X_B(m)$  คือค่าที่ได้สูญเสีย ค่าพลังงานบนสายโทรศัพท์จาก B ถึง A คือค่าน้อยสุดเมื่อกำจัดสัญญาณสะท้อนออกมา  $X_A^{echo}(m)$  คือ สัญญาณสะท้อนเท่ากัน,  $X_A^{echo}(m)$  บนสายสัมประสิทธิ์ของตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนบางทีใช้ปรับค่าที่เห็นออกไปของค่าที่นำมาใช้ที่มีความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดหรือ (Least mean squared error : LMS) แต่ก็มีอีกอย่างหนึ่งที่นำมาใช้ คือ วิธี NLMS (Normalized least mean square error) คือปรับค่าเวลาใช้เป็นปัจจุบันเท่ากันของสัมประสิทธิ์ตัวกรองคือ

$$h(m) = h(m-1) + \mu \frac{e(m)}{x(m)_A^T x_A(m)} x_A(m) \quad (2.5)$$

ที่  $X_A(m) = [X_A(m), \dots, X_A(m-P)]$  and  $h(m) = [h_0(m), \dots, h_{p-1}(m)]$  คือสัญญาณเข้าและค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำจัดสัญญาณสะท้อน และ  $e(m)$  คือ ค่าสัญญาณความผิดพลาดนั้นคือค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณสะท้อนกับสัญญาณที่ออกมาจากการสังเคราะห์ ข้อสังเกตคือทำให้จำนวนปกติ  $X(m) X(m)^T x_A(m)$  คือพลังงานของสัญญาณพูดถึงตัวกรองปรับค่าได้ ขนาดของ  $\mu$  คือการปรับค่า Step size และควบคุมความเร็วให้เข้าหากันและมีความสม่ำเสมอและมีความคงทนในการทำงาน

### 2.2.2 สัญญาณสะท้อนทางเสียง (Acoustic Echo)

สัญญาณสะท้อนทางเสียงเป็นผลมาจากการสะท้อนกันของสัญญาณระหว่างหูฟัง

และไมโครโฟนในโทรศัพท์มือถือ การประชุมผ่านเครือข่าย เป็นต้น สัญญาณสะท้อนทางเสียงนี้ เอกสารแนะนำวิธีกำจัดสัญญาณสะท้อนทางเสียงในโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น สัญญาณสะท้อนทางเสียงนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือการสะท้อนจากภายนอกเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะเพดานและพื้นห้องและเสียงรบกวนต่างๆ ถ้ากำหนดช่วงเวลาไม่นาน จากนั้นสัญญาณสะท้อนแบบนี้บางทีก็เกิดสัญญาณสะท้อนบ้างเล็กน้อยและบางทีอาจเป็นการเพิ่มศิลปะของเสียงเข้าไปด้วย ลักษณะของสัญญาณสะท้อนในห้องโถงหรือหอประชุม สามารถยกระดับคุณภาพของเสียงขึ้นมาได้ อย่างไรก็ตามสัญญาณสะท้อนทางเสียงนี้ยังเป็นปัญหาเกี่ยวกับแฮนด์ฟรี (hands free) ในระบบโทรศัพท์, การประชุมผ่านเครือข่าย, ระบบที่อยู่สายโทรศัพท์มือถือและเครื่องช่วยฟัง เป็นต้น สัญญาณสะท้อนจะเป็นคลื่นเสียงระหว่าง ลำโพงและไมโครโฟน สัญญาณสะท้อนทางเสียงเป็นผลมาจากการรวมกันของการสะท้อน โดยตรงและปฏิกิริยาทางคลื่นเสียงจากสิ่งแวดล้อมและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไมโครโฟนและที่แน่ที่สุดคือในการสะท้อนสามารถให้ผลที่รุนแรง ถ้าเป็นส่วนสำคัญในการส่งสัญญาณเสียงผ่านลำโพงคือตัวรับกับไมโครโฟนและการแผ่กระจายเกิดขึ้นระหว่างไมโครโฟนกับลำโพงเป็นการวนลูป ทำให้เกิดเสียงโหยหวนขึ้น รอบการเพิ่มขึ้นทั้งหมดขึ้นอยู่กับคาบของเสียงของทางไฟฟ้าและสัญญาณสะท้อนทางเสียง สิ่งที่ไม่ต้องการทางไฟฟ้าสามารถลดลงได้โดยผ่านการออกแบบระบบคือออกแบบให้มีความถี่ตอบสนองตามตัว ปัญหาหลักก็คือในสัญญาณสะท้อนทางเสียงและลักษณะที่ค่าต่อของเวลาถ้าไมโครโฟนลำโพงและห้องเกิดความถี่พร้อมกันทำให้เกิดความถี่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนเพิ่มขึ้นมา และเกิดเสียงโหยหวนขึ้น ข้อจำกัดของเสียงโหยหวนนั้นทำให้โดยผ่านสมการหลายๆ ชั้นของระบบไฟฟ้า

วิธีการที่จะลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงวิธีแรกเพื่อลดเสียงสะท้อนในสายคือเปลี่ยนความถี่ที่ใช้อยู่ แต่ละเวลาของสัญญาณเดิมรอบๆ ผ่านจำนวนเฮิร์ตที่น้อยมากก่อนที่จะส่งสัญญาณใหม่อีกครั้ง ผ่านลำโพง วิธีแบบนี้เป็นการลดเสียงโหยหวนแต่ก็ยังไม่ลดการเพิ่มความถี่ของสัญญาณสะท้อน บางทีอาจจะกำจัดได้สำเร็จเมื่อใช้ตัวกรองปรับค่าได้ในระบบแต่ที่ความถี่ก็ยังมีแกว่งของสัญญาณอยู่ ข้อเสียของวิธีนี้คือเพิ่มการลด Feedback ไปการที่ใช้ตัวกรองมากจะทำให้สัญญาณความถี่เกิดการผิดรูปขึ้น

วิธีนี้มีพอที่จะเอาสัญญาณสะท้อนออกมาที่สุดคือใช้ตัวกรองรับค่า (Adaptive echo canceller) ดังรูป 2.21 แสดงการจำลองการเกิดสัญญาณสะท้อนจากสภาพแวดล้อมที่เกิดด้วยไมโครโฟนลำโพงและเสียงสะท้อนในห้อง Z-transfer function จะได้สมการดังนี้

$$H(z) = \frac{G(z)}{1 - G(z)A(z)} \quad (2.6)$$

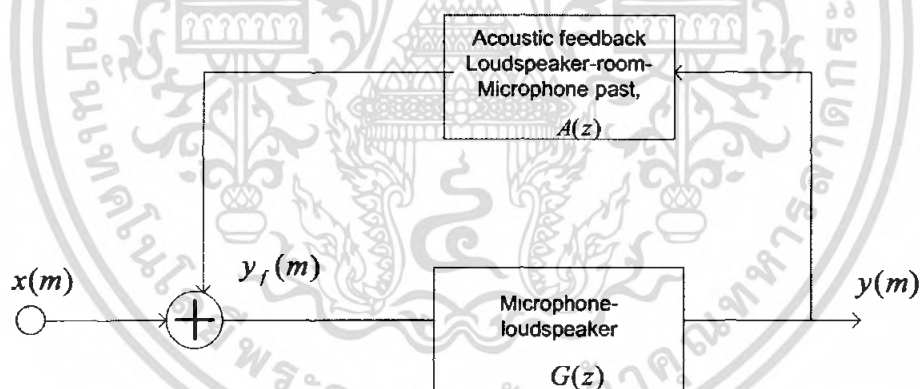
ที่  $X(z)$  คือ z-transfer function แทน ไมโครโฟน-ลำโพง และ  $A(z)$  คือ z-transfer function แทน เสียงสะท้อนจากสภาพแวดล้อม สมมุติรวมความถี่ไมโครโฟนและลำโพงไว้เป็นจุดเดียวเพื่อลดค่า  $b$  จะได้สมการที่(2.6)

$$H(z) = \frac{G}{1 - GA(z)} \quad (2.7)$$

เนื่องจากลักษณะการสะท้อนในห้อง  $A(z)$  คือสัญญาณสะท้อนในระบบลักษณะ การสะท้อนของสภาพแวดล้อมของห้องจำลองผ่าน การทำแบบจำลองให้เป็น 3 มิติ หรือ ค่า ระยะใกล้ๆ ได้ใช้ตัวกรองแบบ FIR ในแบบจำลอง

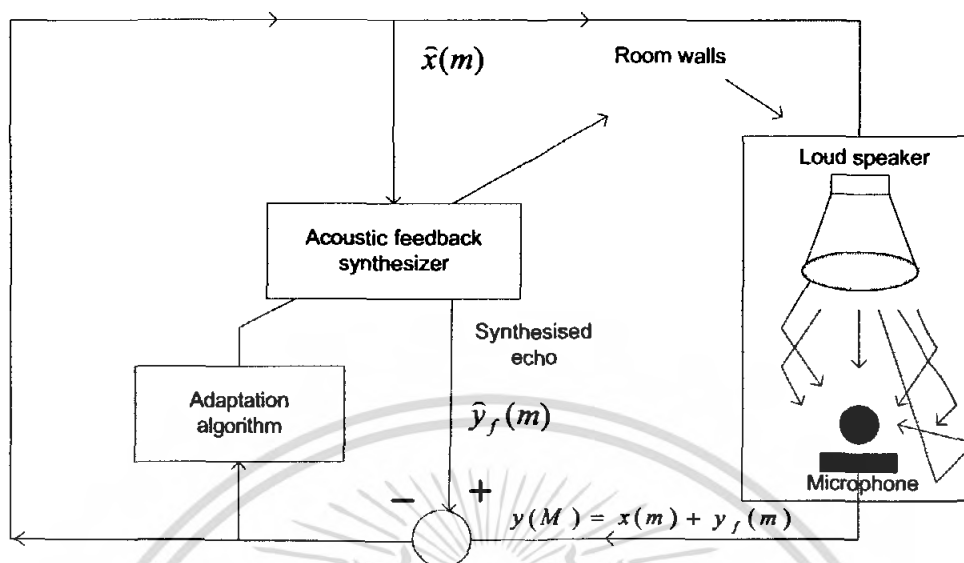
เมื่อค่า Time-domain input/output เท่ากัน จะมีความสัมพันธ์กับตัวกรองของ แบบจำลองดังแสดงที่สมการ 2.7 คือให้ผ่านความแตกต่างที่ได้ดังนี้

$$y(m) = \sum_{k=0}^p a_k(m)y(m-k) + Gx(m) \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.21 แสดงระบบการปรับแต่งค่าสัญญาณสะท้อนใน ไมโครโฟน - ลำโพง - ห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงการปรับค่าของการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงในสภาวะแวดล้อมในห้อง

ที่  $a_k(m)$  คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองการสะท้อนของทั้งหมดในห้อง

$G$  คือ อัตราการขยายของไมโครโฟนและลำโพง  $x(m)$  และ  $y(m)$  คือเวลาที่เข้าและออกของสัญญาณของระบบไมโครโฟน-ลำโพง

รูปที่ 2.22 แสดงระบบการกำจัดเกี่ยวสะท้อนในการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม รวมทั้งหมดของสัญญาณเข้าถึง ไมโครโฟนให้รวมสัญญาณที่เข้าใหม่ไปถึงไมโครโฟน  $x(m)$  บวกกับสัญญาณสะท้อนที่ไม่ต้องการ  $y_f(m)$  :

$$y(m) = x(m) + y_f(m) \quad (2.9)$$

การที่จะควบคุมระบบการกำจัดสัญญาณสะท้อนได้ดีที่สุดคือทำบนพื้นฐานการปรับเปลี่ยนประเมิณค่าและกำจัดสัญญาณสะท้อน ในขณะที่สายที่กำจัดสัญญาณสะท้อน จะต้องกำจัดสัญญาณสะท้อนและจำลองรูปแบบของสัญญาณสะท้อนออกมา

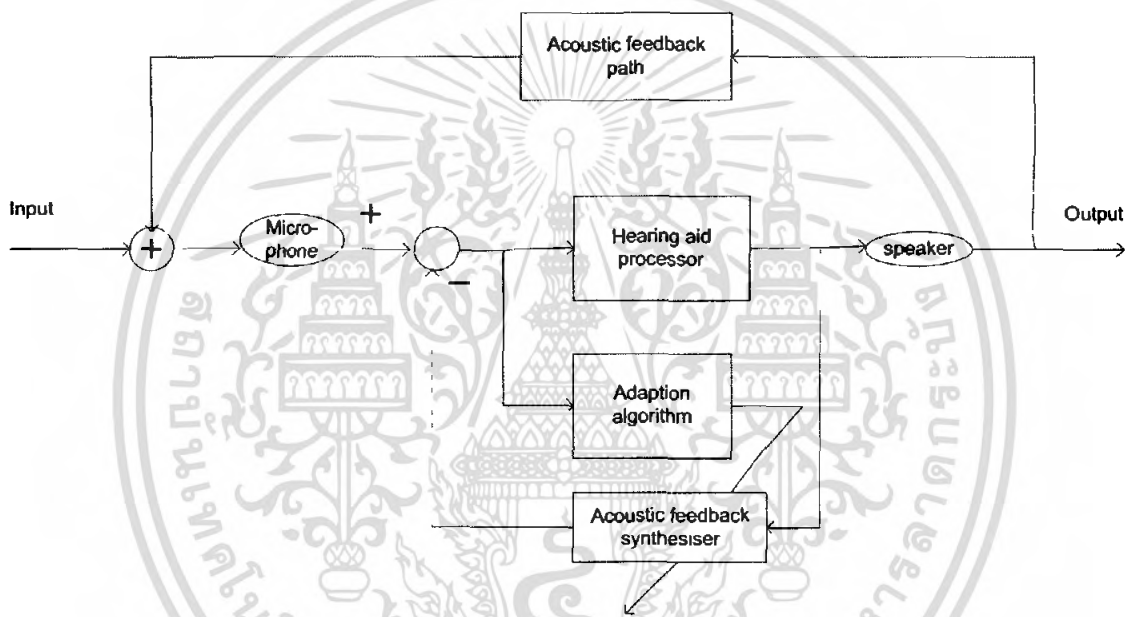
$$\hat{y}_f(m) = \sum_{k=0}^P a_k(m) y(m-k) \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะปรับค่าสัญญาณให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e(m) = x(m) + y_f(m) - \hat{y}_f(m) \quad (2.11)$$

หลักการปรับเปลี่ยนโยปกติแล้วคือจะให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดและใช้ตัวกรองวิธีแบบ LMS หรือ RLS ปัญหาของตัวกำจัดสัญญาณคือมีความซับซ้อนมากกว่าสายของตัวกำจัดสัญญาณสะท้อน อันดับแรกโดยปกติแล้วสัญญาณสะท้อนทางเสียงจะยาวกว่าสัญญาณสะท้อนทางไฟฟ้า ในความจริงแล้วค่าหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนทางเสียงก็คล้ายกับสัญญาณสะท้อนในระบบดาวเทียมแบบ จีโอสแตร์นารี (geostationary)



รูปที่ 2.23 การปรับการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงทั้งหมดในระบบ

ค่าความหน่วงเวลาหลายๆ ของสัญญาณทางเสียงที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อตัวกรองบนคำสั่งพวกนี้ค่าสัมประสิทธิ์ 1000 ตัวที่ต้องการ ความคงทนและความเร็วของตัวกรองปรับค่าได้นี้มีความยาวที่แตกต่างกันนี้คือปัญหา ต่อมาก็คือลักษณะของเส้นทางของสัญญาณสะท้อนทางเสียงที่การเคลื่อนที่อยู่ตลอดมากกว่าของสัญญาณสะท้อนของสายโทรศัพท์ ตัวอย่างเช่นการเปิดหรือปิดประตู หรือผู้คนเข้าออกห้อง ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้อย่างกะทันหัน อันดับสามคือ สัญญาณสะท้อนทางเสียงถูกสะท้อนกลับมาด้วยความแตกต่างของเส้นทางเช่น กำแพง, พื้นห้อง, เพดาน, หน้าต่างสุดท้ายคือลักษณะการแพร่และกระจายของสัญญาณสะท้อนทางเสียงในอากาศในห้องและกำแพงที่ไม่ได้ผ่านตัวกรองแบบ FIR หรือ IIR เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะของแบบจำลองที่เหมาะสมของสัญญาณสะท้อนในสายโทรศัพท์จะเป็นความยาวของตัวกรอง ในกรณีอื่นๆ สำหรับการกำจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

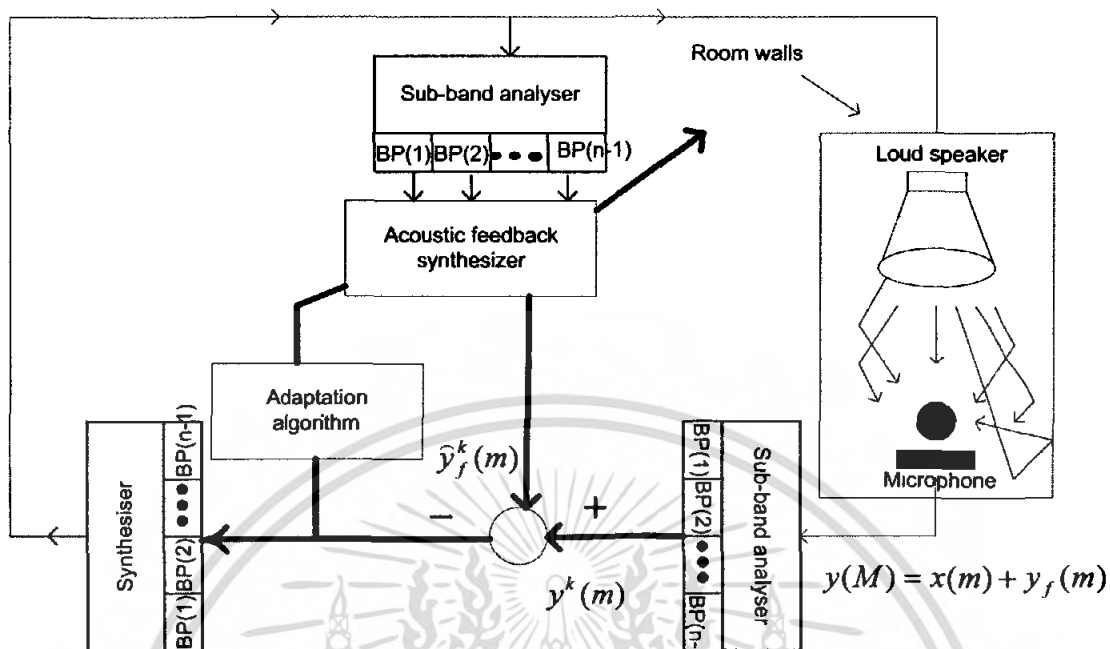
สัญญาณสะท้อน ตัวกรองจะต้องมีค่าตอบสนองการกระตุ้นที่เออะๆ และต้องมีลักษณะการเปลี่ยนสัญญาณสะท้อนที่เริ่ม

ข้อสำคัญในการประยุกต์ของตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนทางเสียงคือระบบเครื่องช่วยฟังระบบเครื่องช่วยฟังสามารถเป็นแบบจำลองระบบการกลับคืน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ที่นิยมมากในระบบเครื่องช่วยฟังคือข้อจำกัดผ่านการย้อนกลับระหว่างไมโครโฟนและลำโพง รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบภายนอกของการกำจัดการย้อนกลับ การปรับค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของการสังเคราะห์การย้อนกลับออกมาผ่าน ไมโครโฟน หลังจากออกทางไมโครโฟนแล้วก็ป้อนลำโพง

### 2.2.2.1 ตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนทางเสียงด้วย sub-band

มีการเพิ่มความซ้ำซ้อนเข้าไปและค่าผันแปรของห้องด้วย มีปัญหาหลักอยู่ 2 ข้อใหม่ในการแก้ปัญหาสัญญาณสะท้อน อันดับแรกค่าความหน่วงเวลาของสัญญาณสะท้อนค่อนข้างขยายและด้วยเหตุนี้ตัวกรองแบบ FIR ที่ใช้สังเคราะห์สัญญาณสะท้อนซึ่งมีตัวเลขสัมประสิทธิ์ที่เออะมากๆ ประมาณ 2000 ตัวหรือมากกว่านั้น อันดับสองคือ มีผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองแบบ FIR ที่ยาวและสัญญาณพูดจะมีค่าเจาะจงที่กว้างและผลที่ได้คือจะทำให้ช้าและไม่สม่ำเสมอ อัตราการเข้าหากันของการทำงานเปลี่ยนแปลง

พื้นฐานของตัวกำจัดสัญญาณสะท้อนแบบ sub-band จะช่วยลดปัญหาที่เกี่ยวกับความต้องการระยะเวลาของตัวกรองและความเร็วในการทำงาน พื้นฐานของระบบ sub-band ดังแสดงในรูป 2.24



รูปที่ 2.24 การรวมของระบบการลดสัญญาณสะท้อนทางเสียงแบบ sub-band

Sub-band จะวิเคราะห์ส่วนที่แตกของสัญญาณเข้ามา  $N$  sub-band สมมติให้ sub-band ทำให้ค่าแบนด์วิดค์แต่ละ sub-band จะมี  $\frac{1}{N}$  ของความถี่แบนด์และทำให้ไม่เกิดการสูญเสียของข้อมูล เพื่อความเข้าใจง่ายข้อสมมติให้ sub-band ทั้งหมดคือการลดการสูญเสียโดยผ่านตัวแปร  $R$  ข้อได้เปรียบของ sub-band คือการลดความยาวของตัวกรองและเพิ่มความเร็วการเข้าหากัน

### บทที่ 3

#### อะแดปทีฟฟิลเตอร์

ในแวดวงของการออกแบบวงจรอนาล็อก คำว่าวงจรกรองอนาล็อก(Analogue filter) นั้นคือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ (frequency response) อาจจะเป็นทางขนาดหรือเฟสที่ไม่เท่ากันในแต่ละย่านความถี่ เพื่อหวังผลในการตัดแปลง หรือ “แยก” ย่านความถี่ หรือความถี่เฉพาะ ที่ต้องการออกจากส่วนที่ไม่ต้องการ ตัวอย่างเช่นวงจรกรองต่ำผ่าน (low pass filter) นั้น เป็นวงจรกรองที่ให้สัญญาณขาเข้าเฉพาะความถี่ตั้งแต่ ศูนย์ เฮิรตซ์ (Hertz) ขึ้นไป จนถึงความถี่ที่ค่าๆหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความถี่คัทออฟ(cut-off frequency) ผ่านไปได้ และ ทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณที่มีความถี่เกินกว่านั้น ส่วนวงจรสูงผ่าน(high pass filter) จะให้ผลที่กลับกัน คือ ขอมให้สัญญาณที่มีความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟให้ผ่านไปได้ และลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำไม่ให้ผ่านไปได้

ตัวปรับแต่งช่องสัญญาณนั้นสร้างมาได้จากการออกแบบอัลกอริทึม (Algorithm) ทางด้านการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งเป็นกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างเป็นวงจรดิจิทัลฟิลเตอร์ (Digital filter) โดยหน้าที่หลักของวงจรปรับแต่งช่องสัญญาณ ก็คือการสร้างผลตอบสนองที่ตรงกันข้ามกับผลตอบสนองของช่องทางการสื่อสาร ซึ่งในทางด้านการประมวลผลสัญญาณจะเรียกว่าการทำ อินเวอร์สแชนเนล (inverse channel) การ Implementation ของอัลกอริทึมหลายๆ ลงชีพ DSP นั้นก็เป็นการใช้โปรแกรมทำงานเพื่อให้ผลเกี่ยวกับการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การกำหนดเรียกอัลกอริทึมที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับแต่งช่องสัญญาณว่าวงจรกรองนั้น มาจากไอเดียของทฤษฎีการออกแบบการประมวลผลสัญญาณนอร์เบิร์ต วินเนอร์ (Norbert Wiener) (1894-1964) ซึ่งศึกษาการสร้างอัลกอริทึมด้วยวงจรเชิงเส้น เขาพบว่า วงจรที่สร้างจาก อัลกอริทึมที่เขาคิดค้นนั้น ทำหน้าที่ในการแยก สัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสัญญาณรบกวนสีขาว (White noise) ดังนั้นรูปแบบของการทำงานของอัลกอริทึมนี้ จะคล้ายคลึงกับ วงจรกรองอนาล็อกที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่ที่ต้องการออกจากสัญญาณความถี่อื่นๆ ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรู้สึกในเชิงเทียบเคียงกันของ คำว่า วงจรกรอง และ อัลกอริทึมวินเนอร์ (Wiener) จึงเรียกอัลกอริทึมของเขว่าเป็น “วงจรกรอง” ซึ่งต่อมาภายหลังก็ได้ มีการกำหนดชื่ออัลกอริทึมของวินเนอร์ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุด (Optimum filter) ว่า เป็น วงจรกรองวิน

เนอร์ (Wiener filter) เพื่อเป็นเกียรติและ การเรียกอัลกอริทึมว่าเป็นวงจรรอง ก็เป็นที่ใช้กันเรื่อยมา ทั่วทุกวันนี้

ช่องสัญญาณสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารไร้สายนั้น มีลักษณะที่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ได้ ดังนั้นการกำหนดค่าคุณสมบัติของตัวปรับแต่งช่องสัญญาณแบบที่ดีที่สุดเหมาะสมที่สุด สำหรับ ช่องสัญญาณหนึ่ง ณ เวลาหนึ่ง ก็อาจจะไม่ดีไม่เหมาะสม กับช่องสัญญาณนั้น ณ เวลาอื่นๆ ก็เป็นไปได้ ดังนั้นการใช้วงจรรองที่มีการปรับตัวได้ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัว ปรับแต่งช่องสัญญาณ โดย เมื่อระยะเวลาปรับตัวสิ้นสุดลง หรือที่เรียกว่า “ลู่อเข้าหาคำตอบ (Convergence)” เรียบร้อยแล้ว วงจรรองนั้นก็จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุดเหมาะสมที่สุด กับทุกๆ เวลา และ ทุกๆ ช่องสัญญาณ และนั่นหมายถึง การลด ISI ลงสู่ระดับที่ให้ความผิดพลาดที่ต่ำ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับฟิลเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลสัญญาณ ดิจิตอลในการลดสัญญาณสะท้อน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำกระบวนการอะแดปทีฟร่วมกับ ฟิลเตอร์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟิลเตอร์ที่ทำหน้าที่ปรับปรุงแก้ไขสัญญาณทางการสื่อสาร ข้อมูลดิจิตอล

### 3.1 ตัวกรองความถี่หรือฟิลเตอร์

การกรองความถี่จะมีวงจรรองความถี่ที่สำคัญคือ วงจรรองแบบผ่านต่ำ (Low-pass) วงจรรองแบบผ่านสูง (High-pass) วงจรรองแบบผ่านแถบ (Band-pass) วงจรรองแบบแถบหยุด (Band-stop) และวงจรรองแบบผ่านทุกความถี่ ซึ่งตัวกรองความถี่แบบดิจิตอลสามารถแบ่งได้สอง แบบ [5] คือ ตัวกรองความถี่แบบ Finite Impulse Respond (FIR filter or Non-recursive digital filter) และตัวกรองความถี่แบบ Infinite Impulse Respond (IIR filter or Recursive digital filter) ตัวกรองความถี่แบบ FIR นั้นจะมีฟังก์ชันถ่ายโอนหรือทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ที่ประกอบด้วยซีโร่ (Zero) ไม่มีโพล (Pole) ทำให้ระบบมีความเสถียรภาพอย่างแน่นอนและมี ผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้น (Linear phase) แต่มีข้อเสียคือต้องมีจำนวนอันดับ (Order) สูงจึง ทำให้ตัวกรองทำงานได้ดี ตัวกรองความถี่แบบ IIR นั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะประกอบไปด้วยทั้งซีโร่ และโพล ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาทางด้านความเสถียรภาพ แต่ถ้ามีการออกแบบที่ดีจะทำให้ปัญหา ดังกล่าวนี้ลดลงหรือไม่เกิดขึ้นเลย ข้อดีของตัวกรองความถี่แบบ IIR เมื่อเทียบกับตัวกรองความถี่ แบบ FIR คือที่สมรรถนะของการทำงาน (Performance) เท่ากัน ตัวกรองความถี่แบบ IIR จะใช้ จำนวนอันดับที่น้อยกว่า ซึ่งทำให้การคำนวณน้อยกว่าด้วย ซึ่งความซับซ้อนในการคำนวณนี้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำคัญมากเมื่อนำตัวกรองความถี่ไปใช้งานที่เวลาจริง (Real time) ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งมีข้อจำกัดทางด้านจำนวนบิต และความเร็วในการทำงาน ตัวกรองความถี่ที่มีจำนวนการคำนวณน้อยกว่าจะทำให้ไมโครโปรเซสเซอร์ทำงานน้อยลง และทำงานได้เร็วกว่า

หลักการเลือกใช้ระหว่าง FIR และ IIR สามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

1. การประยุกต์ใช้งานทางการสื่อสารข้อมูล (Data transmission) ทางการแพทย์ และการประมวลผลสัญญาณภาพ จำเป็นต้องใช้ตัวกรองความถี่ที่ให้ผลตอบสนองทางเฟสเป็นเชิงเส้นซึ่งตัวกรองความถี่แบบ FIR จะเหมาะสมกว่าตัวกรองความถี่แบบ IIR
2. สำหรับการใช้งานที่เวลาจริง ซึ่งต้องมีการจำกัดจำนวนบิตนั้น การคำนวณสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะทำให้การปัดเศษ (Round - Off) ซึ่งทำให้เกิด Round -Off Noise ขึ้น ซึ่ง Round -Off Noise นี้ จะเกิดขึ้นในตัวกรองความถี่แบบ FIR น้อยกว่าที่เกิดขึ้นในตัวกรองความถี่แบบ IIR
3. ในกรณีที่มีความต้องการความชันในช่วงแถบหยุด (Cutoff) สูงนั้น ตัวกรองความถี่แบบ FIR จะต้องใช้จำนวนสัมประสิทธิ์มากกว่าตัวกรองความถี่แบบ IIR
4. ตัวกรองความถี่แบบ IIR สามารถออกแบบได้โดยตรงจากตัวกรองต้นแบบในตัวกรองความถี่แบบอนาลอกแต่ตัวกรองความถี่แบบ FIR ทำไม่ได้
5. ตัวกรองความถี่แบบ FIR จะสังเคราะห์ได้ค่อนข้างยากถ้าหากไม่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

จากทั้งหมดที่กล่าวมาจะพอสรุปเป็นแนวทางสำหรับการนำไปใช้งานได้ดังต่อไปนี้

- จะใช้ตัวกรองความถี่แบบ IIR ก็ต่อเมื่อในงานที่มีความต้องการความชันในช่วงแถบหยุดสูง ซึ่งตัวกรองความถี่แบบ IIR จะใช้จำนวนสัมประสิทธิ์น้อยกว่า
- จะใช้ตัวกรองความถี่แบบ FIR ถ้าจำนวนสัมประสิทธิ์ไม่มากจนเกินไป โดยเฉพาะสำหรับงานที่ต้องการความผิดเพี้ยนทางเฟสน้อยจะเหมาะสมอย่างยิ่ง

### 3.1.1 ตัวกรองความถี่แบบ FIR (Finite impulse response)

ตัวกรองความถี่แบบ FIR จะเป็นตัวกรองความถี่ที่มีการรวมเอาเฉพาะอย่างค่าของอินพุตที่เวลาปัจจุบันและอดีตมาประมวลผลเพื่อให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการ ซึ่งเราสามารถเขียนสมการของตัวกรองความถี่แบบ FIR ได้ดังต่อไปนี้

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(n-k) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

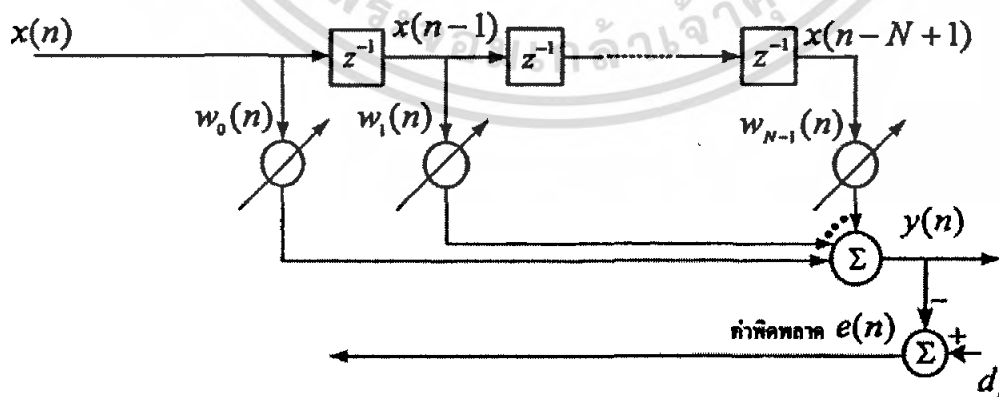
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองความถี่แบบ FIR คือ

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k).z^{-k} \quad (3.2)$$

โดยที่  $h(k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองต่ออิมพัลส์ของตัวกรองความถี่  $N$  คือ จำนวนข้อมูล

ตัวกรองความถี่แบบ FIR เป็นฟิลเตอร์ที่ให้คุณสมบัติที่สำคัญคือความคงที่สัญญาณเอาต์พุต เนื่องจากมันจะให้เฉพาะซีโรเท่านั้นและให้ความเป็นคุณลักษณะของเฟสเป็นเชิงเส้น จะป้องกันการผิดเพี้ยนของสัญญาณเอาต์พุต จำนวนของสัมประสิทธิ์ของสมการ (3-1) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ของ FIR ในโดเมนเวลา โดยพิจารณาเพียงค่าของอินพุต  $x(n)$  ในค่าอดีตและปัจจุบันเท่านั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของฟิลเตอร์จะใช้ในการวิเคราะห์และหาค่าผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์

โดยทั่วไปการออกแบบของตัวกรองความถี่แบบ FIR จะพยายามลดจำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ให้มีจำนวนน้อยที่สุดในขณะที่ยังคงรักษาคุณสมบัติที่ต้องการไว้ อยู่ในทางปฏิบัติจะมีการใช้จำนวนของค่าสัมประสิทธิ์ประมาณ 11-150 ตัว คุณสมบัติที่สำคัญคือ ความคงที่ของสัญญาณเอาต์พุตเนื่องจากตัวกรองความถี่แบบ FIR ซึ่งยากที่จะพบในตัวกรองความถี่แบบ IIR การที่ตัวกรองความถี่แบบ FIR ให้คุณลักษณะของเฟสเชิงเส้นนั้นจะมีผลให้สัญญาณที่ผ่านมาช่วงความถี่ที่ต้องการในแต่ละแบบของตัวกรองความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของตัวกรองความถี่แบบ FIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของอะแดปทีฟฟิลเตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และหาค่าสมรรถนะของอะแดปทีฟอัลกอริทึม จุดมุ่งหมายก็คือ เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาการออกแบบโดยประยุกต์ใช้อะแดปทีฟอัลกอริทึมเพื่อนำไปแก้ปัญหาในทางปฏิบัติ

### 3.2.1 โครงสร้างของอะแดปทีฟฟิลเตอร์

อะแดปทีฟฟิลเตอร์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับผลตอบสนองที่ต้องการในเวลาเหมาะสม ในการประยุกต์ใช้อะแดปทีฟฟิลเตอร์ โดยทั่วไปอาจจะมีสัญญาณหนึ่งอินพุตหรือมากกว่า และผลตอบสนองของสัญญาณที่ต้องการ ซึ่งอาจผ่านหรือไม่ผ่านตัวอะแดปทีฟฟิลเตอร์ก็ได้ อะแดปทีฟฟิลเตอร์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังรูปที่ 3.2 ดังนี้

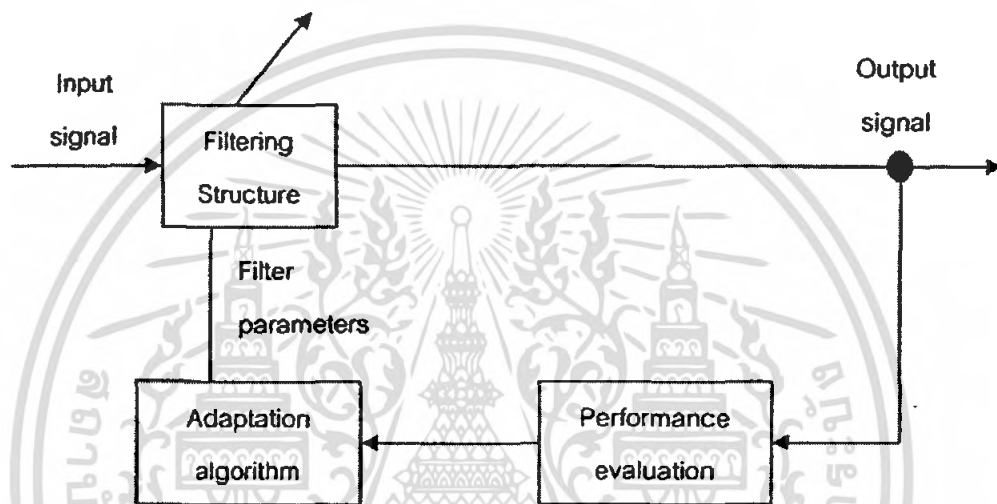
- โครงสร้างของฟิลเตอร์ โดยส่วนของฟิลเตอร์นี้จะใช้ตัวสัญญาณอินพุตหนึ่งสัญญาณหรือมากกว่านั้น โครงสร้างของฟิลเตอร์จะเป็นแบบเชิงเส้น ค่าที่สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะการรวมกันอย่างเป็นเชิงเส้นของสัญญาณอินพุตที่วัดได้ ในทางกลับกัน โครงสร้างของฟิลเตอร์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ยกตัวอย่างเช่น ตัวฟิลเตอร์สามารถปรับผลตอบสนองของดิจิทัลฟิลเตอร์แบบ FIR ที่สร้างด้วย โครงสร้างแบบตรง หรือแลคทิส หรือ โครงสร้างแบบคาสเคด โครงสร้างต่างๆ เหล่านี้จะไม่สามารถเปลี่ยนได้แต่พารามิเตอร์จะถูกรับเปลี่ยนไปโดยอะแดปทีฟอัลกอริทึม

- เกณฑ์การหาสมรรถนะ สัญญาณเอาต์พุตของอะแดปทีฟฟิลเตอร์และผลที่ตอบสนองที่ต้องการนั้นจะผ่านกระบวนการของเกณฑ์การหาสมรรถนะ เพื่อให้ได้คุณภาพตามต้องการหรือขึ้นอยู่กับความต้องการของการประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน ส่วนมากแล้วอะแดปทีฟฟิลเตอร์ จะพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยกำลังสองเพราะเป็นคณิตศาสตร์ที่ไม่ยากนักและสามารถนำไปใช้กับระบบที่ออกแบบไว้ใช้ในทางปฏิบัติได้

- อะแดปทีฟอัลกอริทึมนั้นจะใช้ค่าของเกณฑ์การหาสมรรถนะ หรือบางฟังก์ชันของเกณฑ์การหาสมรรถนะ และทำการวัดค่าอินพุตและผลตอบสนองที่ต้องการ เพื่อนำไปทำการตัดสินใจว่าจะทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์อย่างไร เพื่อนำไปสู่สมรรถนะที่ดีขึ้น ความซับซ้อนและคุณลักษณะของอะแดปทีฟอัลกอริทึมขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของโครงสร้างของฟิลเตอร์และเกณฑ์การหาสมรรถนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบอะแดปทีฟฟิลเตอร์ บางชนิดนั้นมีความจำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นและลักษณะเฉพาะเจาะจงของการประยุกต์ใช้งานนั้นๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้จำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดสมรรถนะ และเลือกโครงสร้างของฟิลเตอร์ ขั้นตอนการออกแบบอะแดปทีฟอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนที่ยากที่สุดในการออกแบบและประยุกต์ใช้อะแดปทีฟฟิลเตอร์

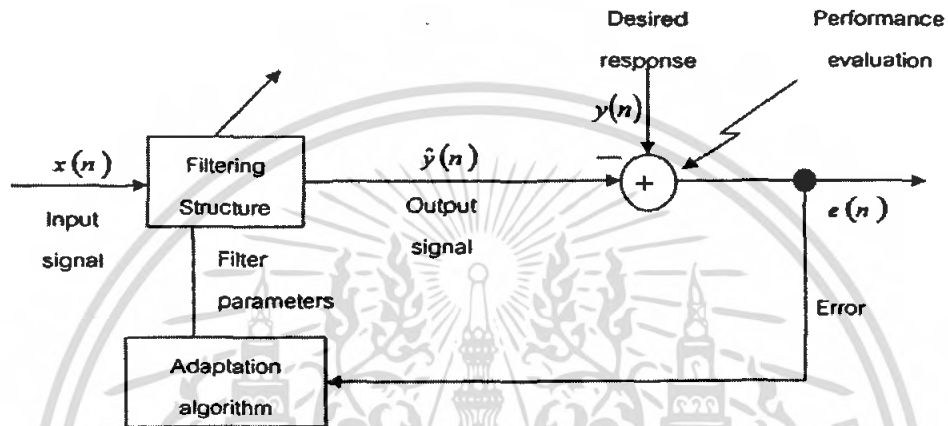


รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของอะแดปทีฟฟิลเตอร์

จุดมุ่งหมายของอะแดปทีฟฟิลเตอร์คือ หาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด และจึงหยุดทำการปรับค่าพารามิเตอร์ คาบเวลาตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการฟิลเตอร์จนถึงกระทั่งเวลาที่ทำให้สมรรถนะเข้าใกล้ค่าที่ดีที่สุดเราเรียกว่า โหมดการลู่เข้า และถ้าหากสภาพของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้อะแดปทีฟฟิลเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่ง ได้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด จะเรียกว่าโหมดการติดตาม

ปัจจัยที่มีผลกระทบมากในการออกแบบอะแดปทีฟฟิลเตอร์คือ ผลตอบสนองของสัญญาณที่ต้องการหาที่จะหาได้ บางครั้งผลตอบสนองที่ต้องการนี้ไม่สามารถหาค่าได้จากการใช้อะแดปทีฟฟิลเตอร์ ดังนั้นการปรับตัวจะต้องอาศัยวิธีการใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

Supervised adaptation ที่ช่วงระยะเวลาใดๆ อะแดปทีฟฟิลเตอร์จะทราบถึงผลตอบสนองที่ต้องการ จำนวนค่าผิดพลาด (ความแตกต่างระหว่างผลตอบสนองที่ต้องการและผลตอบสนองจริง) หากค่าเกณฑ์ของสมรรถนะและนำค่าที่ได้เหล่านี้ไปปรับค่าสัมประสิทธิ์ของฟิลเตอร์ ซึ่ง โครงสร้างของ Supervised อะแดปทีฟฟิลเตอร์แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของ Supervised อะแดปทีฟฟิลเตอร์

เมื่อไม่สามารถหาค่าผลตอบสนองที่ต้องการได้ (Unsupervised adaptation) อะแดปทีฟฟิลเตอร์ไม่สามารถมีรูปแบบที่ชัดเจนและจะนำค่าผิดพลาดที่ได้ไปควบคุมสมรรถนะให้ดีขึ้นในการประยุกต์ใช้งานบางอย่างสัญญาณอินพุตมีคุณสมบัติบางอย่างที่วัดได้ เช่น ขนาดของสัญญาณที่ทำให้เสียเวลาไปก่อนที่จะเข้าสู่อะแดปทีฟฟิลเตอร์ อะแดปทีฟฟิลเตอร์จะทำการปรับพารามิเตอร์ในทางที่ว่าคุณสมบัติที่สูญเสียไปของสัญญาณอินพุต

### 3.1.2 วงจรกรองความถี่ปรับตัวได้แบบเอฟไออาร์ (Adaptive FIR Filter)

ในการศึกษาวงจรกรองแบบปรับตัวได้นั้น โดยทั่วไปมักจะเริ่มจากการศึกษาวงจรกรองปรับตัวได้แบบเอฟไออาร์เสียก่อน เนื่องจากตัวกรองแบบเอฟไออาร์มีคุณสมบัติบางประการที่ดีกว่ากล่าวคือ เสถียรภาพของระบบที่ดีกว่า เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของตัวกรองที่มีค่าจำกัด อัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับตัวก็ง่ายกว่า นอกจากนั้นแล้วประสิทธิภาพของตัวกรองก็สามารถมองได้ในลักษณะของการลู่เข้าและเสถียรภาพ ต่อไปจะแสดงการหาอัลกอริทึมสำหรับวงจรกรองปรับตัวได้แบบเอฟไออาร์ โดยใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุดหรืออัลกอริทึมแบบแอลเอ็มเอส ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ง่ายที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่นๆและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกรองแบบเฟอไออาร์ ซึ่งมีสัญญาณอินพุทเป็น  $x(n)$  มีสมการทั่วไปคือ

$$y(n) = \sum_{h=0}^{N-1} h(n)x(n-k) \quad (3.3)$$

ให้สัญญาณที่ต้องการเป็น  $d(n)$  แล้วสัญญาณความผิดพลาดสามารถนิยามโดย

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3.4)$$

สำหรับความต้องการโดยทั่วไปของตัวกรองปรับตัว การเลือกสัมประสิทธิ์  $h_0(n), h_1(n), \dots, h_k(n)$  นั้น จะอยู่บนพื้นฐานของการลดสัญญาณความผิดพลาดให้น้อยที่สุด โดยยึดเอาค่าเฉลี่ยกำลังสองในการเปรียบเทียบ

โดยทั่วไปนั้นแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมจะใช้วิธีการปรับสัมประสิทธิ์แบบสตีปเปสต์ เดสเซนท์ (Steepest Descent) ซึ่งก็คือ

$$\bar{h}(n+1) = \bar{h}(n) - \mu \nabla e^2(n) \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\bar{h}(n) = [h_1(n) - h_2(n) \dots h_{N-1}(n)]^T$  เป็นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์  $\mu$  จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การก้าวเข้า (Step size) และ  $\nabla$  เป็นค่าเกรเดียนท์เวกเตอร์ซึ่งกำหนดโดย

$$\nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial h_0} \frac{\partial}{\partial h_1} \dots \frac{\partial}{\partial h_{N-1}} \right]^T \quad (3.6)$$

ดังนั้นเกรเดียนท์ตัวที่  $k$  ของเกรเดียนท์เวกเตอร์  $\nabla e^2(n)$  คือ

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial h_k} = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial h_k} \quad (3.7)$$

ค่า  $e(n) = d(n) - y(n)$  ลงในสมการข้างต้นจะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial h_k} = -2e(n) \frac{\partial y(n)}{\partial h_k} \quad (3.8)$$

แทนค่า  $y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(n)x(n-k)$  ลงในสมการข้างต้นจะได้เป็น

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial h_k} = -2e(n)x(n-k) \quad (3.9)$$

ดังนั้นจากสมการข้างต้นจะพบว่า

$$\nabla e^2(n) = -2e(n)\bar{x}(n) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $\bar{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \dots x(n-N+1)]^T$  หลังจากทำการแทนค่าแล้วจะได้สมการปรับสัมประสิทธิ์เป็น

$$\bar{h}(n+1) = \bar{h}(n) + 2\mu e(n)\bar{x}(n) \quad (3.11)$$

จากสมการทั้งหมดเราจะได้อัลกอริทึมโดยสรุปเป็น

อินพุต : เวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $\bar{h}(n) = [h_0(n) \ h_1(n) \dots h_{N-1}(n)]^T$   
 อินพุตเวกเตอร์  $\bar{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \dots x(n-N+1)]^T$

สัญญาณที่ต้องการ  $d(n)$

เอาต์พุต : พิลเตอร์เอาต์พุต  $y(n)$

เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ปรับแล้ว  $\bar{h}(n+1)$

1. การกรองสัญญาณ

$$y(n) = \bar{h}^T(n)\bar{x}(n)$$

2. การประมาณค่าความผิดพลาด

$$e(n) = d(n) - y(n)$$

3. การปรับสัมประสิทธิ์

$$\bar{h}(n+1) = \bar{h}(n) + 2\mu e(n)\bar{x}(n)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean squares , LMS)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดวิธีแบบนี้ เป็นหาค่าเฉลี่ยกำลังสองความผิดพลาดน้อยที่สุดซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการหาค่านีหาได้โดยใช้ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งค่านี้จะแทนด้วยการทำงานของสมการมีวิธีในการปรับค่าดังนี้

$$w(m+1) = w(m) + \mu \left[ \frac{\partial e^2(m)}{\partial w(m)} \right] \quad (3.12)$$

ที่ค่าความผิดพลาดของสัญญาณ  $e(m)$  คือ ความแตกต่างระหว่างผลของตัวกรองที่ปรับค่า และค่าที่ออกแบบไว้  $x(m)$  จะได้

$$e(m) = x(m) - w^T(m)y(m) \quad (3.13)$$

เมื่อแทนค่าก็จะเห็นความชัดเจนขึ้นจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial e^2(m)}{\partial w(m)} &= \frac{\partial}{\partial w(m)} [x(m) - w^T(m)y(m)]^2 \\ &= -2y(m)[x(m) - w^T(m)y(m)] \\ &= -2y(m)e(m) \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อแทนสมการที่ 3.14 ไปที่ตัวกรองของสมการที่ 3.12 ค่าที่ปรับจะได้

$$w(m+1) = w(m) + \mu[y(m)e(m)] \quad (3.15)$$

เราจะเห็นได้ว่าเป็นการปรับค่าที่ง่ายตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด(LMS) นี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้กับตัวกรองปรับค่าได้ที่เป็นเช่นนี้เพราะมีการปรับค่าให้เท่ากัน เช่น การลดสัญญาณสะท้อน, เรดาร์ (radar) เป็นต้นข้อได้เปรียบของวิธีแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดนี้คือเป็นวิธีที่ง่ายในการกำหนดความต้องการของหน่วยความจำและง่ายต่อการคำนวณซึ่งที่  $O(P)$  P คือความยาวของตัวกรอง

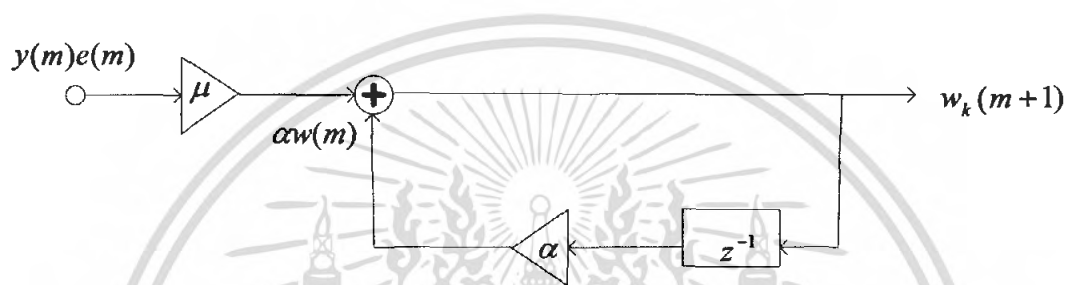
ข้อเสียของวิธีแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด

คือความคงทนและการปรับเปลี่ยนของค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดสามารถปรับได้โดยใช้ตัว  $\alpha$  มาช่วยจะได้

$$w(m+1) = \alpha w(m) + \mu[y(m)e(m)] \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังรูปที่ 3.4 คือการทำสมการสำหรับเวลาที่ปรับให้เท่ากันของ สัมประสิทธิ์ของตัวกรองคือจะปรับค่าสัญญาณเข้าเป็น  $\mu y(m)e(m)$  และมีความยาวเท่ากับ  $\alpha$  เมื่อ  $\alpha < 1$  ซึ่งจะทำให้มีความคงทนและความรวดเร็วขึ้นในการปรับเปลี่ยนสัญญาณลักษณะของสัญญาณที่เข้าไป



รูปที่ 3.4 แสดงการปรับค่าของสัมประสิทธิ์ของตัวแบบ LMS

### 3.4 อัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalised Least Mean Square)

อัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์มีการปรับค่าได้ดังนี้

$$w(m+1) = w(m) + \frac{\mu}{a + \sum_{k=0}^M y^2(m-k)} y(m)e(m) \quad (3.17)$$

ที่ (สมการ) คือ ค่าพลังงานของสัญญาณ

$\mu$  คือ ควบคุมความเร็วในการปรับค่า

$a$  คือ ส่วนอื่นๆที่เล็กน้อย มีค่าเป็น 0 เมื่อสัญญาณเข้า ( $y(m)$ ) เป็น 0

ในวิธีอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ (NLMS) แทนที่จะใช้หลักการค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดในการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ตัวกรองปรับได้กับค่าที่ออกแบบไว้ก็จะใช้หลักการของสมการ  $\delta w(m+1)$  ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์จะได้

$$\|\delta w(m+1)\| = \sum_{k=0}^{p-1} [w_k(m+1) - w_k(m)]^2 \quad (3.18)$$

ผลที่ได้คือ

$$w^T(m+1)y(m) = x(m) \quad (3.19)$$

วิธีแบบนี้จะได้ผลที่น่าพอใจและสามารถทำได้โดยผ่านวิธีแบบ ลาแกรง (Lagrange) ด้วยวิธีนี้จะใช้หลักการโดยกำหนดค่าประสิทธิภาพ  $J(\cdot)$  และการรวมกันของหลักการในสมการที่ 7.113 และสมการ 7.114 จะได้

$$\begin{aligned} J[w(m+1), \lambda] &= \|\delta w(m+1)\| + \lambda [x(m) - w^T(m+1) - w_k(m)]^2 \\ &= \sum_{k=0}^{p-1} [w_k(m+1) - w_k(m)]^2 - \lambda [x(m) \\ &\quad - \sum_{k=0}^{p-1} w_k(m+1)y(m-k)] \end{aligned} \quad (3.20)$$

เมื่อกำหนดค่าที่น้อยที่สุดมาได้  $J[w(m+1), \lambda]$  จะปรับค่าให้ไม่มีค่าแต่ละสัมประสิทธิ์จะได้  $w_i(m+1)$  ถึง 0 จะได้

$$\frac{\partial J[w(m+1), \lambda]}{\partial w_i(m+1)} = 2w_i(m+1) - 2w_i(m) - \lambda y(m-i) = 0 \quad i=0, \dots, p-1 \quad (3.21)$$

จาก 3.21 จะได้

$$w_i(m+1) = w_i(m) - \frac{\lambda}{2} y(m-i) \quad (3.22)$$

จาก 3.22 และ 3.19 จะได้

$$\sum_{m=0}^{p-1} w_i(m)y(m-i) - \frac{\lambda}{2} \sum_{m=0}^{p-1} y(m-i)^2 = x(m) \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการหาค่าลาเกรงค์ จะได้

$$\lambda = \frac{2[x(m) - \sum_{i=0}^{p-1} w_i(m)y(m-i)]}{\sum_{i=0}^{p-1} y^2(m-k)} = \frac{2e(m)}{\sum_{i=0}^{p-1} y^2(m-i)} \quad (3.24)$$

เมื่อนำค่า  $\lambda$  ใน 3.24 มาแทนใน 3.22 วิธีอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ จะได้

$$w_i(m-1) = w_i(m) - \frac{e(m)}{\sum_{k=0}^{p-1} y^2(m-k)} y(m-i) \quad (3.25)$$

สมการ NLMS 3.17 ได้มาจาก 3.25 โดยผ่านการปรับค่าโดย  $\mu$  คือตัวควบคุมอัตราเร็ว และ  $a$  คือตัวหารในการปรับค่าสมการ 3.25 เมื่อสัญญาณเข้าเป็น 0 จะมีค่าเท่ากับ 0 ด้วย

## บทที่ 4

### การออกแบบและวิธีการดำเนินการวิจัย

เมื่อได้ศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีของ อะแดปทีฟฟิลเตอร์ที่จะใช้ในการลดปัญหาเสียงสะท้อนในระบบแล้ว จึงได้ทำการทดลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บ(MATLAB) เพื่อแสดงรายละเอียดการทำงานของฟิลเตอร์ที่จะใช้ในการแก้ปัญหานี้

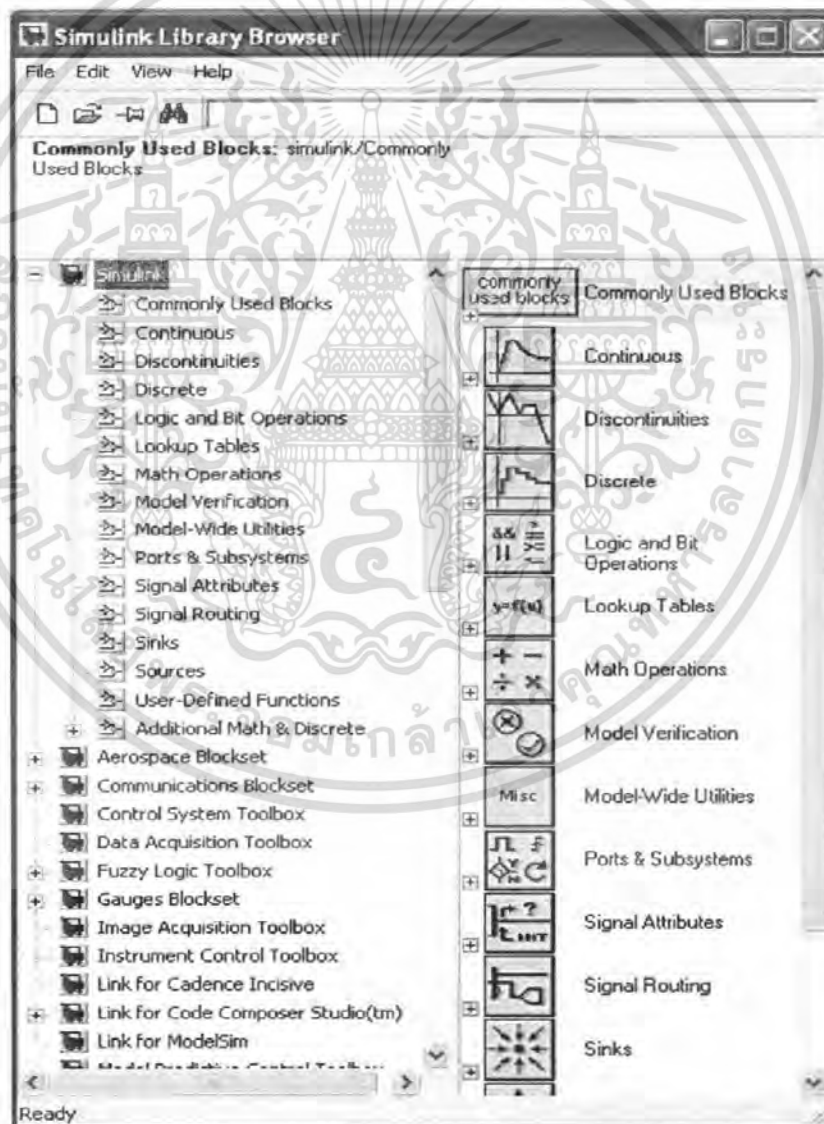
#### 4.1 การใช้โปรแกรม ซิมูลิงค์ เพื่อจำลองการทำงานของฟิลเตอร์

ซิมูลิงค์ (Simulink) เป็นโปรแกรมที่เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาในโปรแกรมแมทแล็บ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดยบริษัท The Mathworks (<http://www.mathworks.com>) โดยเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในส่วนของซิมูลิงค์ นั้นเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ลักษณะการโปรแกรมในรูปแบบของบล็อกไดอแกรม (Block Diagram) เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งมักจะพบปัญหาในการหาโคสฟอร์มโซลูชัน (Closed Form Solution) หรือการหาคำตอบเมื่อเทียบกับเวลาในช่วงเวลาใดๆ และเนื่องด้วยระบบทางวิศวกรรมโดยส่วนใหญ่จะสามารถอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์เช่นกัน ดังนั้น ซิมูลิงค์ จะเข้ามามีบทบาทในการทำให้การจำลองการตอบสนองของระบบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

สำหรับองค์ประกอบของโปรแกรมนั้น ไม่ว่าจะเป็นวงจรทางตรรกศาสตร์ ไปจนถึงระบบควบคุมสำหรับระบบพลศาสตร์ที่ซับซ้อน จะสามารถสร้างแบบจำลองได้โดยอาศัยเพียงบิลด์บล็อก(Building Blocks) พื้นฐานที่มีมาให้จากซิมูลิงค์ไลบรารี (Libraries) นอกเหนือจากนั้นยังมีเครื่องมือในส่วนอื่นๆที่ในปัจจุบันได้เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อให้การใช้งานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น Fuzzy Logic Toolbox, Neural Network Toolbox, Digital Signal Processing (DSP) Toolbox หรืออื่นๆซึ่งในปัจจุบันพบว่าเครื่องมือต่างๆที่มีให้ สามารถทำให้การจำลองหรือวิเคราะห์การทำงานของระบบสามารถทำได้ตั้งแต่ระบบที่มีความง่าย จนถึงระบบที่มีความซับซ้อนอย่างมากโดยไม่ต้องมีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมแต่อย่างใด

ในโปรแกรมซิมูลิงค์นั้น การจำลองปัญหาจะอาศัยการสร้างแผนภูมิ(Simulation Diagram) เพื่อการกำเนิด การรับ หรือส่งผ่านสัญญาณ หรือข้อมูลที่ต้องการทราบในแผนภูมิที่ถูกสร้างขึ้น ข้อมูลจากบล็อกประเภทต่างๆจะถูกส่งผ่าน ไปสู่บล็อกอื่นๆโดยเส้นสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างบล็อกนั้นๆ สัญญาณสามารถที่จะถูกสร้างและส่ง ไปสู่บล็อกอื่นๆทั้งแบบสถิตย์และแบบ

แปรผัน ข้อมูลสามารถป้อนให้แก่ฟังก์ชันเพื่อการกระทำทางตรรกศาสตร์หรือทางคณิตศาสตร์ ข้อมูลสามารถที่จะถูกส่งไปสู่ปลายทาง (Sink) ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นในลักษณะของ Oscilloscope หรือ Display หรือแม้กระทั่งเก็บในรูปแบบของไฟล์คอมพิวเตอร์ (Save to Files) สิ่งที่ต้อง พึงระวังในการจำลองปัญหานั้น ข้อมูลต่างๆจะถูกดำเนินการ รับและส่ง ในลักษณะเป็นช่วงเวลา (Discrete Times) เท่านั้น ดังนั้น สเตปไทม์ (Step Time) หรือ Simulation Time Step หรือ Integration Time Step ที่กำหนดเพื่อการจำลองปัญหานั้นจะเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยการ เลือกใช้ สเตปไทม์ที่เหมาะสม

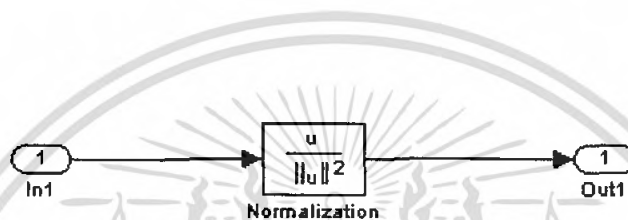


รูปที่ 4.1 เมนูการใช้งานซิมมูลิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การเชื่อมต่อบล็อก

ในการเชื่อมต่อบล็อกบนซิมูเลชันไดอะแกรม (Simulation Diagram) นั้น ให้คลิกเมาส์ปุ่มซ้ายที่เอาต์พุตของบล็อกหนึ่งแล้วค้างปุ่มเอาไว้โดยเคอร์เซอร์ของเมาส์จะเปลี่ยนรูปเป็นเครื่องหมายบวก หลังจากนั้นลาก (Drag) เมาส์ (จะเห็นเส้นประเกิดขึ้นและวิ่งตามเครื่องหมายบวกดังกล่าว) จากบล็อกหนึ่งไปสู่อินพุต Input ของบล็อกที่ต้องการจะเชื่อมต่อ เมื่อคลายเมาส์ปุ่มซ้ายที่อินพุตของอีกบล็อกหนึ่งแล้วเส้นประจะเปลี่ยนเป็นเส้นทึบแสดงถึงการเชื่อมต่อกันของบล็อกทั้งสอง



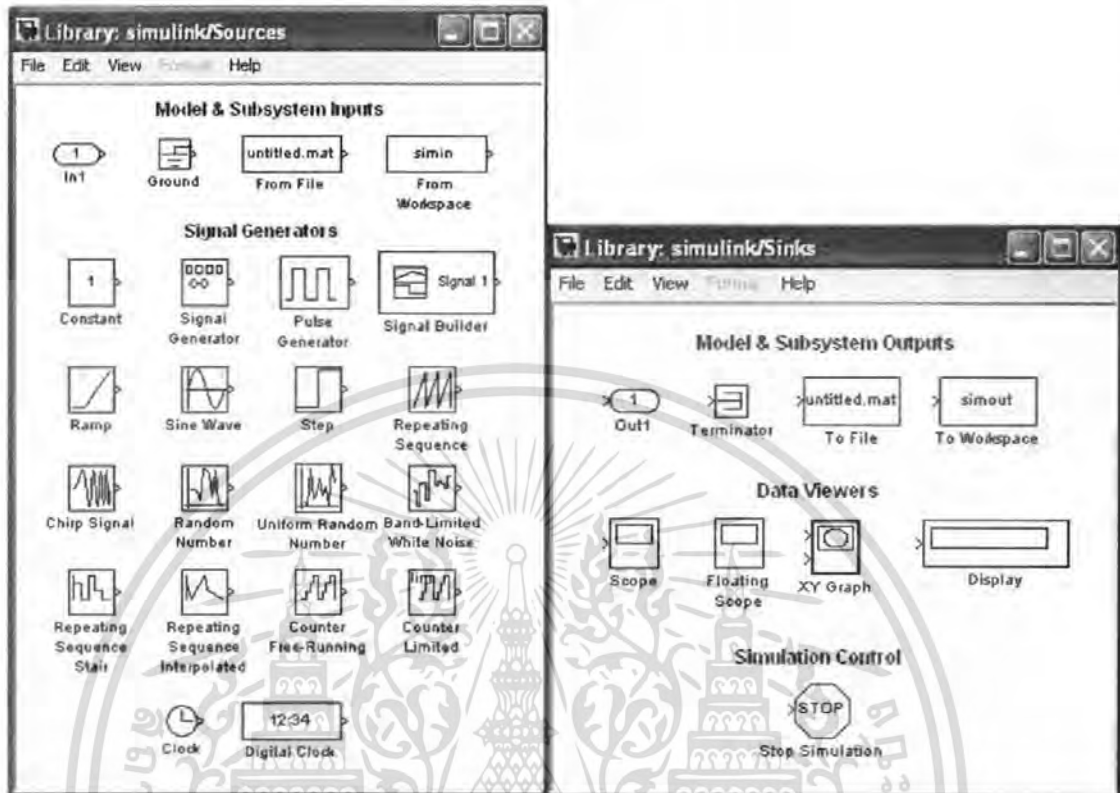
รูปที่ 4.2 แสดงการเชื่อมต่อบล็อก

#### 4.1.2 กลุ่มของบล็อกที่ใช้งานบ่อยในเบื้องต้น

##### แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และปลายทางสัญญาณ (Sinks)

กลุ่มบล็อกแหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) ที่กำหนดมาให้ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดข้อมูลหรือสัญญาณ ที่มักใช้บ่อยในการวิเคราะห์ระบบทางพลศาสตร์ เช่น แหล่งกำเนิดค่าคงที่ (Constant) แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่น (Sinusoidal Wave) แหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Step หรืออื่นๆ นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ทำหน้าที่เสมือนสีกแนลเจเนอเรเตอร์ (Signal Generator) ทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองทางวิศวกรรมอื่นๆ หรือแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock) ที่มักจะใช้บ่อยเพื่อจับเวลาของการจำลองปัญหา หรืออื่นๆ

กลุ่มบล็อกปลายทางสัญญาณ (Sinks) เป็นกลุ่มบล็อกที่มักจะใช้ในการเก็บสัญญาณที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วบล็อกที่จะใช้บ่อยคือบล็อกของสโคป (Scope) ประเภทต่างๆ เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในจุดใดๆ ของระบบที่กำลังถูกจำลองในขณะที่กำลังทำการจำลอง หรือบล็อกที่เก็บสัญญาณ (To Workspace) เพื่อใช้ในการดำเนินการอื่นๆ ที่พื้นที่ทำงานของแมทแล็บ

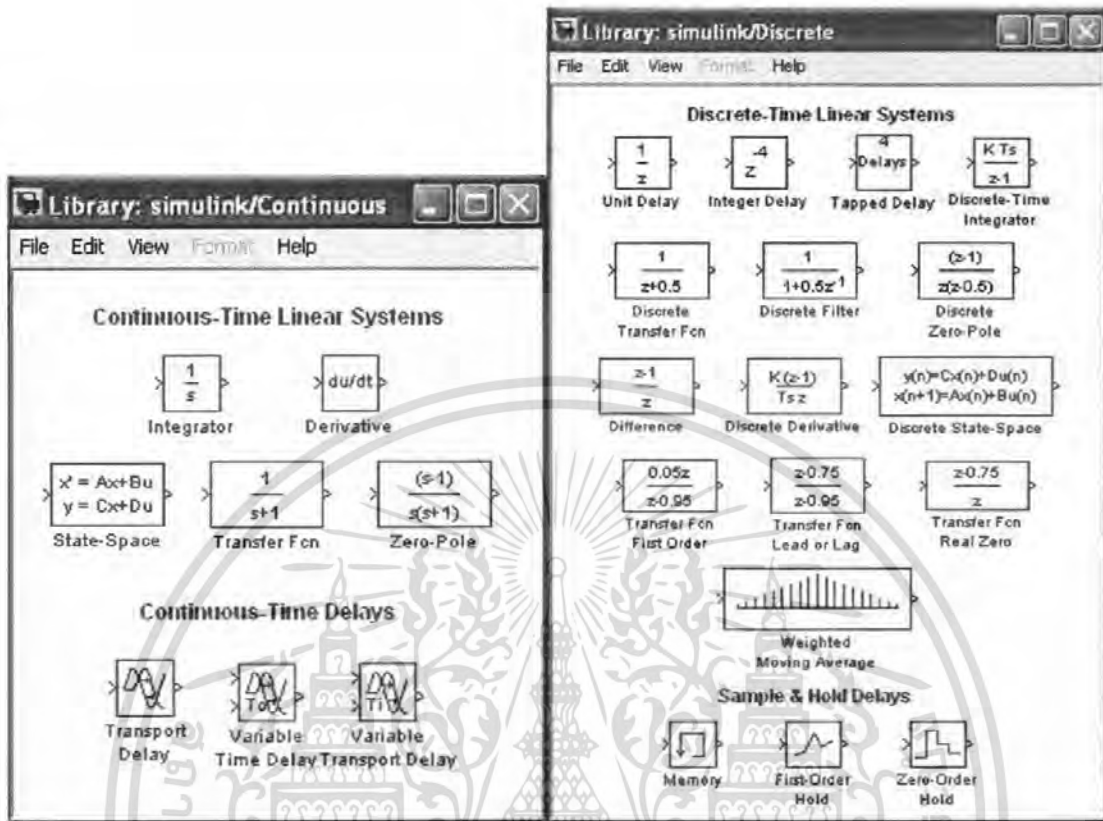


รูปที่ 4.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณ (Sources) และปลายทางสัญญาณ (Sinks)

#### ระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

กลุ่มบล็อกของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-System) เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาของระบบพลศาสตร์ทุกระบบสามารถที่จะถูกวิเคราะห์ในลักษณะของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ซึ่งไม่ว่าระบบจะถูกจำลองในลักษณะใด โปรแกรมจิมมูลิศ์ นั้นสามารถตอบสนองต่อลักษณะรูปแบบของระบบได้ในหลายลักษณะ เช่น ทรานเฟอฟังก์ชัน (Transfer Function) หรือ (Integration Blocks) หรือ (Delay Blocks) หรืออื่นๆ รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะบล็อกที่ใช้ในการกำหนดระบบในลักษณะต่างๆ ของทั้งระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

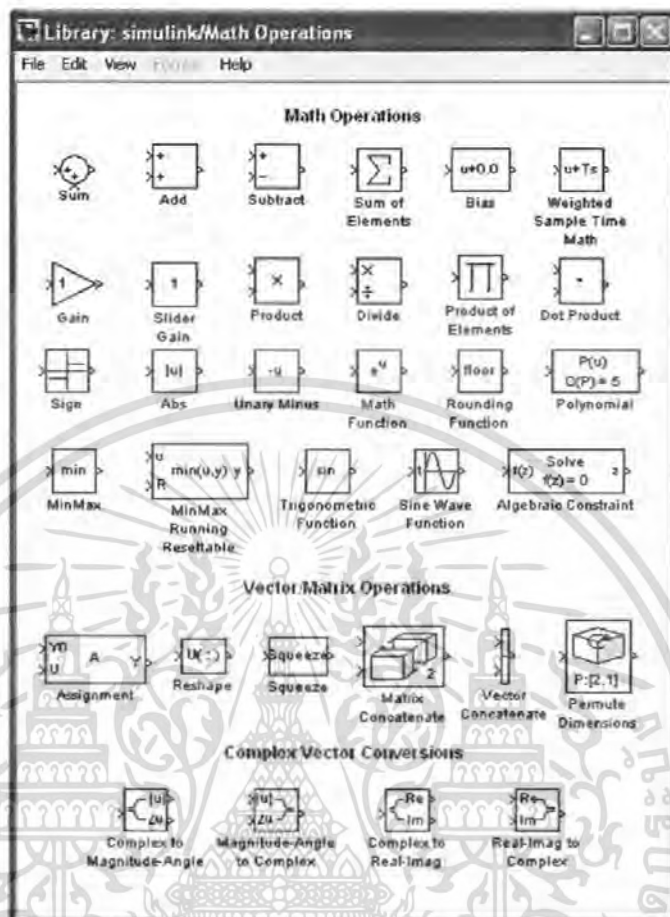


รูปที่ 4.4 แสดงระบบต่อเนื่อง (Continuous) และระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete)

#### การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Math Operations)

กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการใช้ในการจำลองปัญหาบ่อย กลุ่มบล็อกนี้จะประกอบไปด้วยบล็อกย่อยๆ ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการต่างๆ ทางคณิตศาสตร์ เช่น การนำสัญญาณมาบวกกัน (Sum) การคูณสัญญาณด้วยค่าคงที่ (Gain) หรืออื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

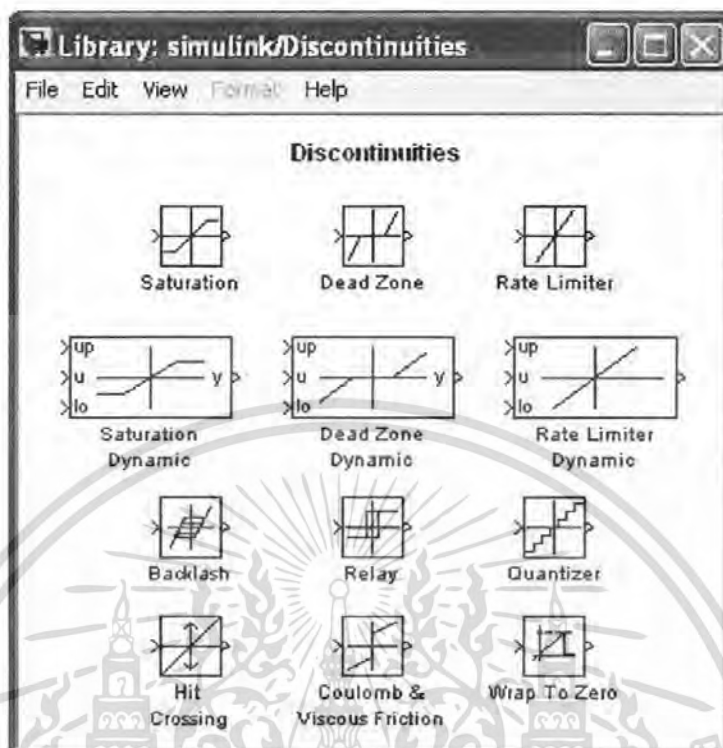


รูปที่ 4.5 กลุ่มบล็อกการดำเนินการทางคณิตศาสตร์

### ความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities)

ข้อได้เปรียบข้อหนึ่งของโปรแกรม ซิมูลิงค์ คือความสามารถในการจำลองระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System Simulation) ซึ่งในการหาคำตอบด้วยมือ หรือการหา โทสฟอร์ม ไซลูชัน โดยทั่วไปจะเป็นการยาก ฟังก์ชันหรือลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นที่พบบ่อยคือซาดูเลชัน (Saturation), ซิกนัม (Signum), ลิมิตสลิวเรต (Limited Slew Rate) หรืออื่นๆ รูปที่ 4.6 แสดงกลุ่มบล็อกดิสคอนทินิว (Discontinuities) ซึ่งแสดงความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถใช้ในการจำลองปรากฏการณ์ทางวิศวกรรมได้หลายเหตุการณ์ เช่น การใช้ ซาดูเลชันบล็อกมักจะใช้แทนข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น ขีดจำกัดของแรงดันทางเข้ามอเตอร์ไฟฟ้า หรือระดับแรงดันสูงสุดในระบบไอครอลิกส์ บล็อก Switches เป็นอีกบล็อกหนึ่งที่ใช้อยู่ เป็นบล็อกที่ใช้ในการจำลองปัญหา IF-THEN เช่นเดียวกับที่พบในการเขียนโปรแกรมโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

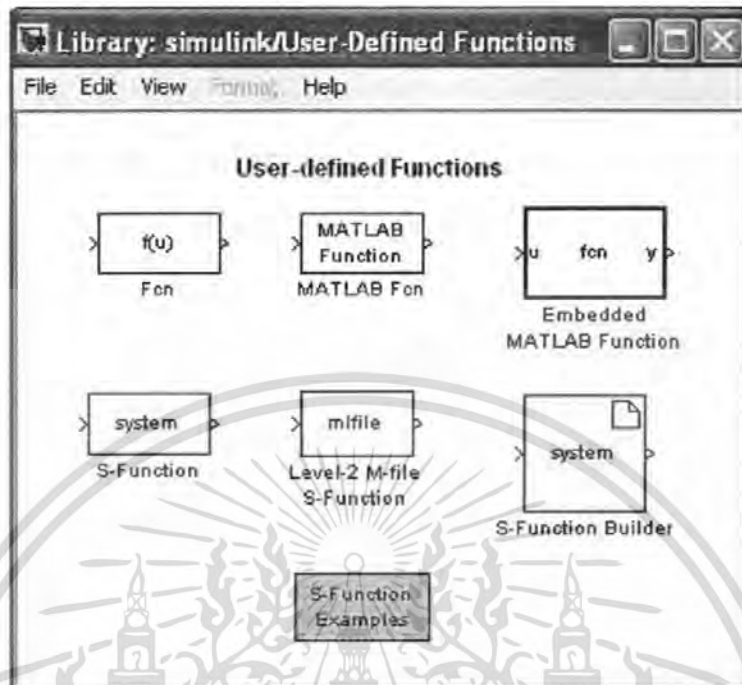


รูปที่ 4.6 แสดงกลุ่มบล็อก Discontinuities

#### ฟังก์ชันที่กำหนดโดยผู้ใช้ (User-defined Functions)

ฟังก์ชันที่เขียนขึ้นโดยใช้ แมทแล็บ โปรแกรม (m-file) หรือเขียนจากภาษา C หรือ ฟอรัวแทน (FORTRAN) สามารถที่จะนำมาใช้ร่วมกับโปรแกรมซิมูลิงค์ โดยใช้บล็อกในหมวด User-defined

Functions โปรแกรมไฟล์ที่เขียนด้วยภาษา C หรือด้วย m-file นั้นเมื่อถูกเรียกใช้โดยบล็อกที่เกี่ยวข้องจะถูกเอ็กซิวต์ (Executed) ทุกเสตปไซส์ (Step Size) ของการจำลองปัญหาซึ่งจะมีผลทำให้การจำลองปัญหาที่มีความล่าช้า แต่จะสะดวกในการเขียนโปรแกรมเอสฟังก์ชัน (S-Functions) จะเป็นไดนามิกลิงค์ไลบรารี (Dynamic Linked Libraries DLL) ซึ่งสามารถเขียนด้วยภาษา C เช่นเดียวกันและเมื่อผ่านการ Compiled แล้วจะเป็นไฟล์ที่ชื่อว่า MEX-file ซึ่งจะมีผลทำให้การจำลองปัญหาที่มีความรวดเร็วมากขึ้น

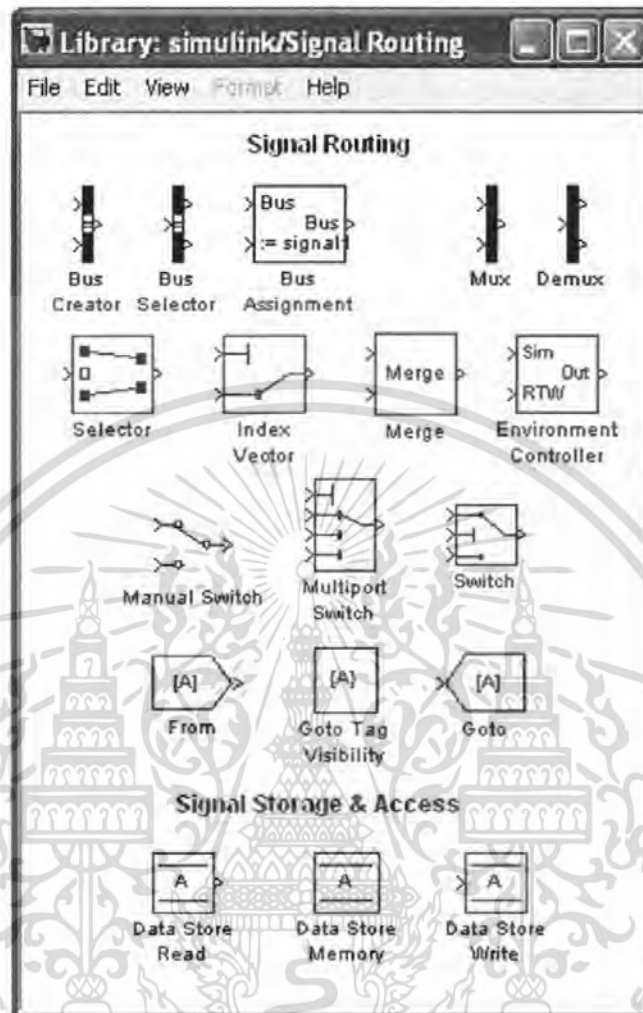


รูปที่ 4.7 บล็อกในหมวด User-defined Functions

#### ทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

ในการจำลองระบบที่มีความซับซ้อน บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการรับ/ส่งสัญญาณจากส่วนหนึ่งของระบบ ไปสู่อีกส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งการใช้เส้นเชื่อมอาจจะไม่สะดวกในการทำงาน ซึ่งบล็อกในชุดนี้เป็นประเภทโกทู (GOTO) บล็อกหรือ ฟอรัมบล็อก บล็อกประเภทมัลติเพล็กซ์ (multiplexing) จะมีประโยชน์ในการจัดระเบียบของแผนภูมิให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงบล็อกทางเดินสัญญาณ (Signal Routing)

#### การกำหนดค่าคงที่ในการจำลองปัญหา (Parameters Configuration)

การจำลองปัญหาคอมพิวเตอร์ จะต้องอาศัยเทคนิคของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการแก้ปัญหาและหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับ โปรแกรม ซิมูลิงค์ นั้น ระบบในรูปแบบต่างๆ สามารถที่จะจำลองทั้งในแบบของระบบต่อเนื่อง (Continuous System) หรือระบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของระบบย่อย การจำลองสามารถที่จะถูกกำหนดให้เริ่ม หรือหยุดที่ช่วงเวลา หรือส่วนหนึ่งของเวลาได้ตามกำหนด ข้อสังเกตที่ต้องพึงระวังคือระยะเวลาที่สนใจในการจำลองปัญหา กับระยะเวลาที่ใช้ในการจำลอง ปัญหา หรือระยะเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สนใจจะไม่ตรงกัน เช่น คอมพิวเตอร์อาจจะใช้ระยะเวลาในการจำลองการตอบสนองในช่วง 10 นาที ของระบบที่สนใจ

เอกสารเพียงวินาทีเป็นต้น สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองแบบปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภทที่ Step Size มีค่าไม่คงที่นั้น (Variable Step Size) เสดปไซค์ ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถกำหนดได้ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขประเภท เสดปไซค์ คงที่ (Fixed Step Size) เป็นวิธีที่มักจะนิยมใช้ในการจำลองปัญหา ทั้งนี้เนื่องจากสามารถระบุช่วงเวลา หรือจุดของเวลาที่สนใจได้อย่างแม่นยำ เสดปไซค์ ที่ใช้ในการจำลองปัญหาจะต้องมีการกำหนดและจะมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบพลศาสตร์ที่สนใจเช่น ในระบบทางความร้อน เสดปไซค์ อาจอยู่ประมาณ 2-3 วินาที ในขณะที่ระบบควบคุมมอเตอร์อาจจำเป็นที่จะต้องใช้ เสดปไซค์ ที่มีค่าน้อยถึง 0.002 – 0.003 วินาที โดยทั่วไป กฎที่ใช้ในการเลือก เสดปไซค์ จะอยู่ที่ประมาณอย่างน้อย 4 – 20 เท่าของระบบที่มีการตอบสนองที่เร็วที่สุด

#### 4.2 ตัวอย่างการจำลองฟิลเตอร์แบบ FIR ด้วยโปรแกรม ซิมมูลิงค์

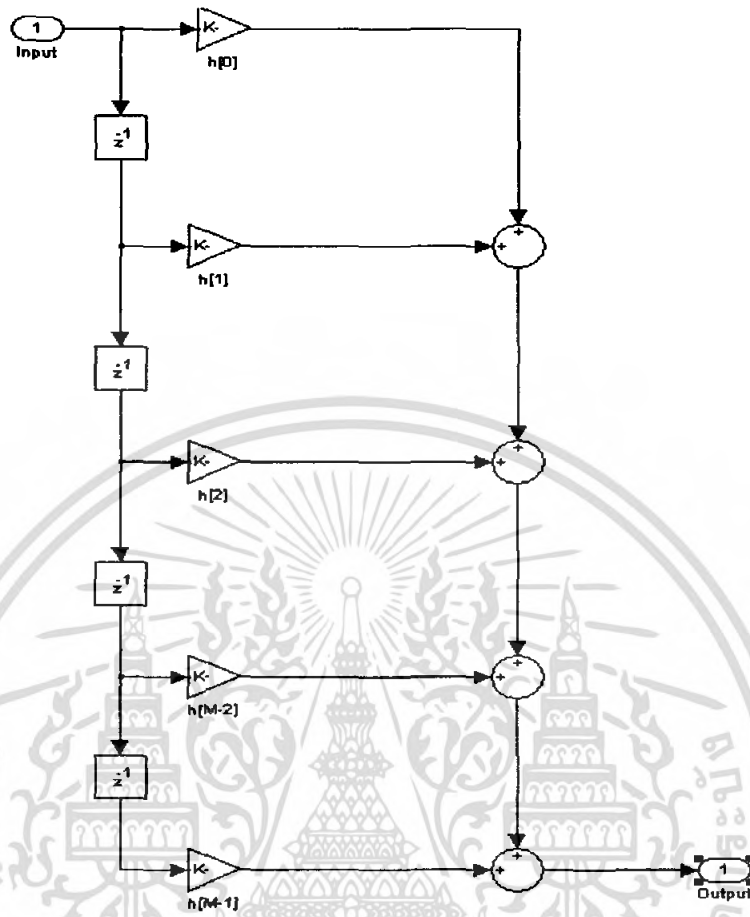
พิจารณาจากโครงสร้างจะเห็นว่าโดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่ต้องคำนวณในการออกแบบคือค่าสัมประสิทธิ์การคูณที่มีทั้งหมด  $M$  ตัว ถ้านำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออกจะได้สมการดังนี้

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} h[k]x[n-k] \quad (4.1)$$

โดยที่  $x[n]$  และ  $y[n]$  แทนลำดับสัญญาณที่ด้านเข้าและด้านออกของวงจรกรอง FIR ตามลำดับ ส่วน  $h[k], k = 0, 1, \dots, M-1$  เป็นสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง ที่บอกถึงผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) เราเรียกสมการความสัมพันธ์ทางเวลาดังกล่าวนี้ว่า สมการผลต่างสืบเนื่อง (difference equation) ซึ่งหากทำการแปลง Z แก่สมการนี้จะให้ผลเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบดังนี้

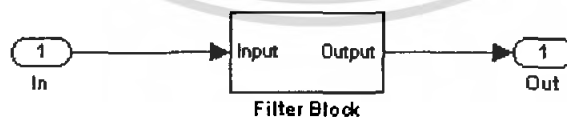
$$H(z) = \sum_{k=0}^{M-1} h[k]z^{-k} \quad (4.2)$$

โครงสร้างของวงจรกรองแบบ FIR ที่มีความยาว  $M$  ประกอบด้วยอุปกรณ์ประวิงเวลาจำนวน  $M-1$  ตัว วงจรคูณ  $M$  ชุด และวงจรบวกอีก  $M-1$  ชุด ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของวงจรกรอง FIR

ซึ่งสามารถทำให้เป็นระบบย่อย (Subsystem) ได้ โดยลากที่วงจรทั้งหมดแล้วคลิกขวาแล้วเลือกสร้างระบบย่อย



รูปที่ 4.10 แสดงระบบย่อยของโครงสร้างของวงจรกรอง FIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

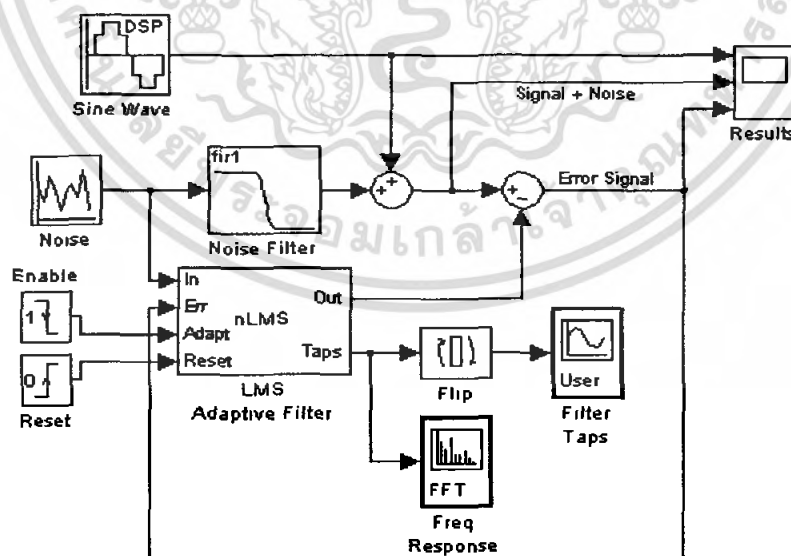
และสร้างเป็นบล็อกของตัวกรองสัญญาณแบบ FIR ขึ้นมาดังรูป



รูปที่ 4.11 แสดง Block ของ FIR Filters

4.3 ตัวอย่างการสร้างรูปแบบ ซิมมูลิงค์ ของวงจร อะแด็ปทีฟฟิลเตอร์แบบอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalised Least Mean Square) ที่จะใช้ในการทดสอบสัญญาณรบกวน

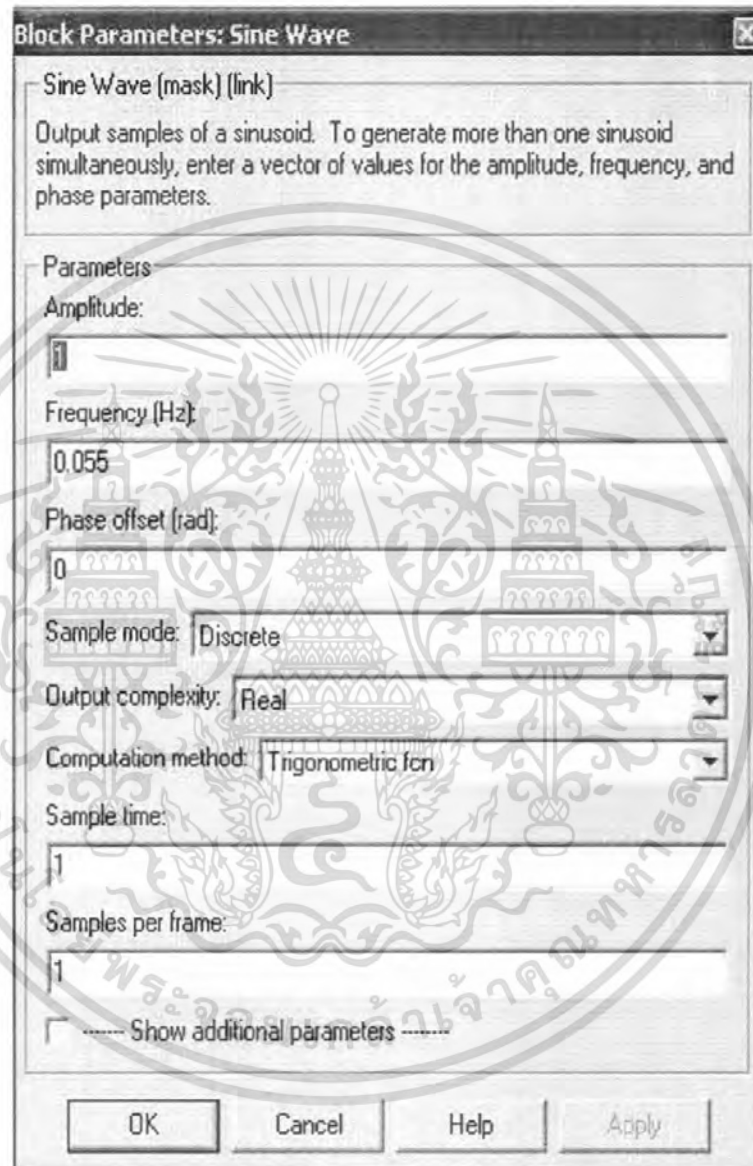
4.3.1 รูปแบบของ ซิมมูลิงค์ ที่ใช้ในการทดลอง อัลกอริทึมแบบอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างการใช้งานอัลกอริธึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

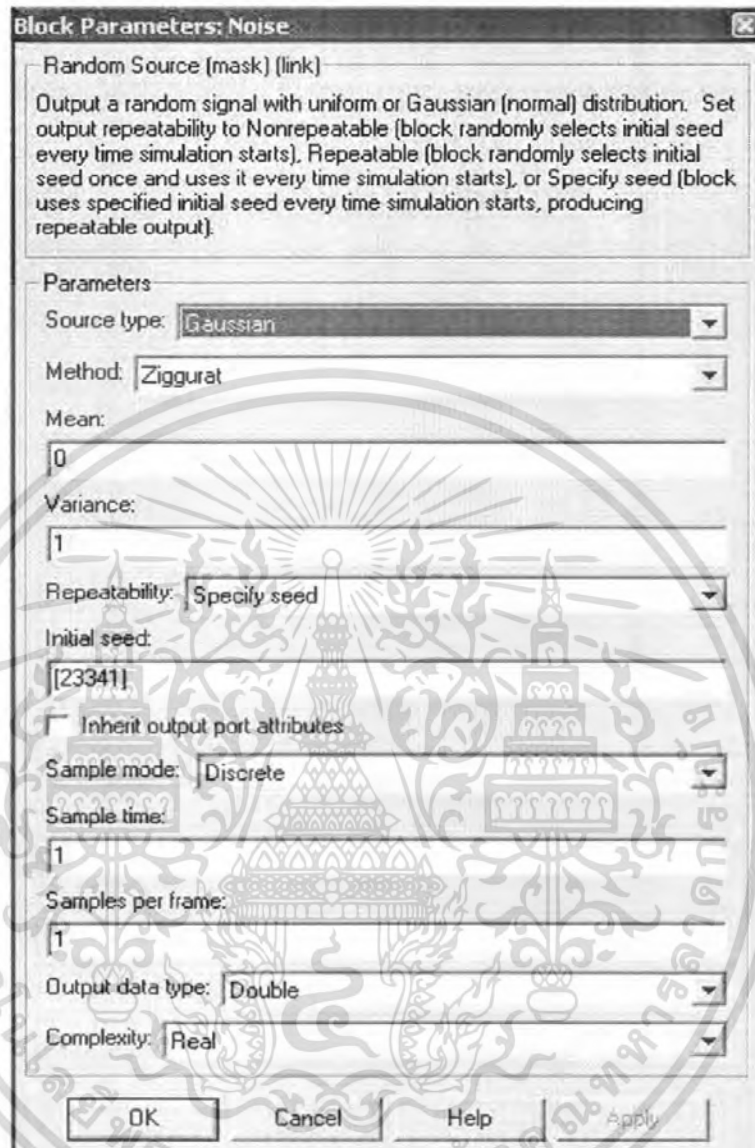
ในส่วนของการจำลองสัญญาณไซน์เวฟ (Sine wave) สามารถทำได้โดยใช้บล็อกสำหรับสร้าง ไซน์เวฟที่ในไลด์บรารีซอส (library Source) โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในบล็อกของ sine wave

ในส่วนของการจำลองสัญญาณรบกวนทำได้โดยการใช้อีกบล็อกเรนดอม(Random source) ซึ่งอยู่ใน ไลด์บรารีซอสซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูป

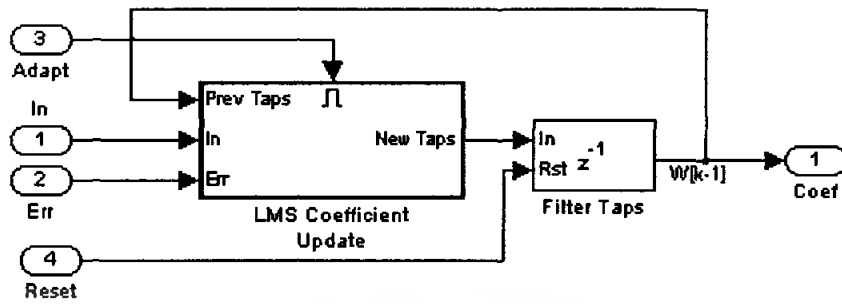
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดง Block random source ในการจำลองค่าสัญญาณรบกวน

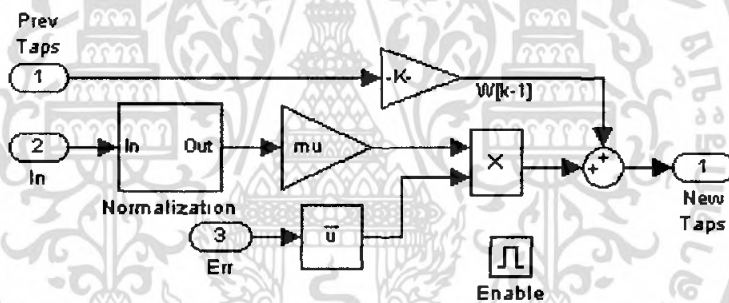
ในส่วนของอะแดปทีฟฟิลเตอร์ และส่วนของซิมมูลิงค์ แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ปรับค่าสัมประสิทธิ์แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด  
แบบนอร์มัลไลซ์

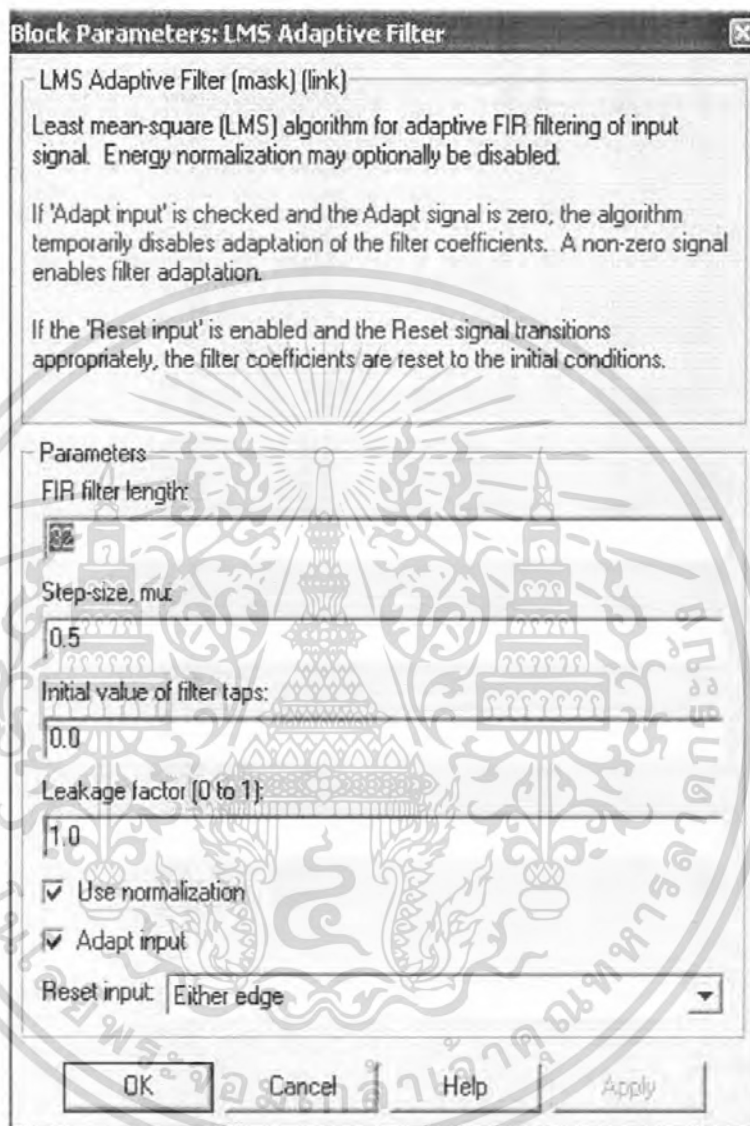
ซึ่งแสดงอัลกอริทึมในการปรับค่าในระบบย่อย ดังนี้



รูปที่ 4.16 แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ปรับค่าสัมประสิทธิ์ของอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด  
แบบนอร์มัลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูปต่อไปนี้

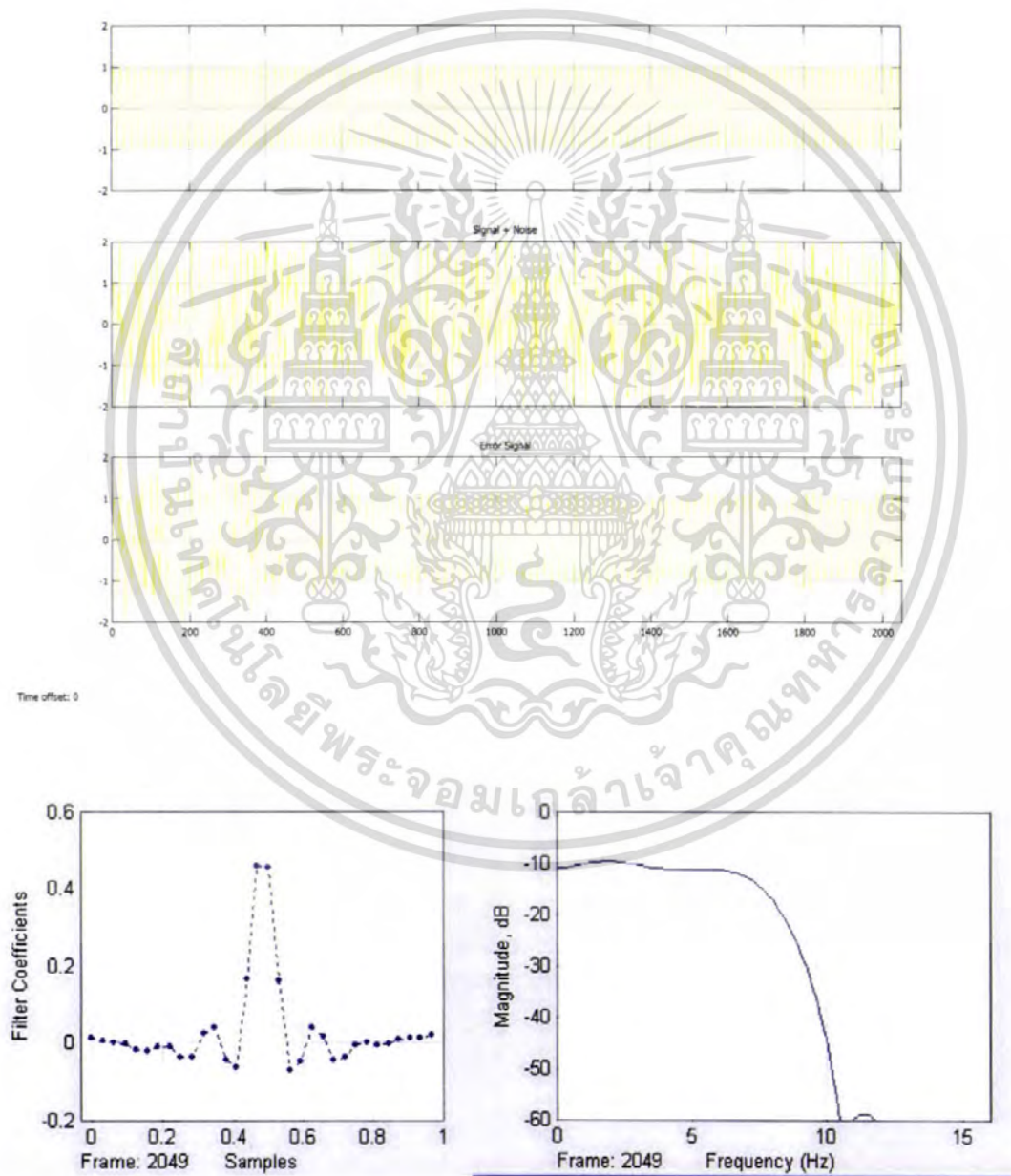


รูปที่ 4.17 แสดงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ย  
น้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 ผลจากการจำลองสัญญาณจากตัวกรองแบบออลกอร์ริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์

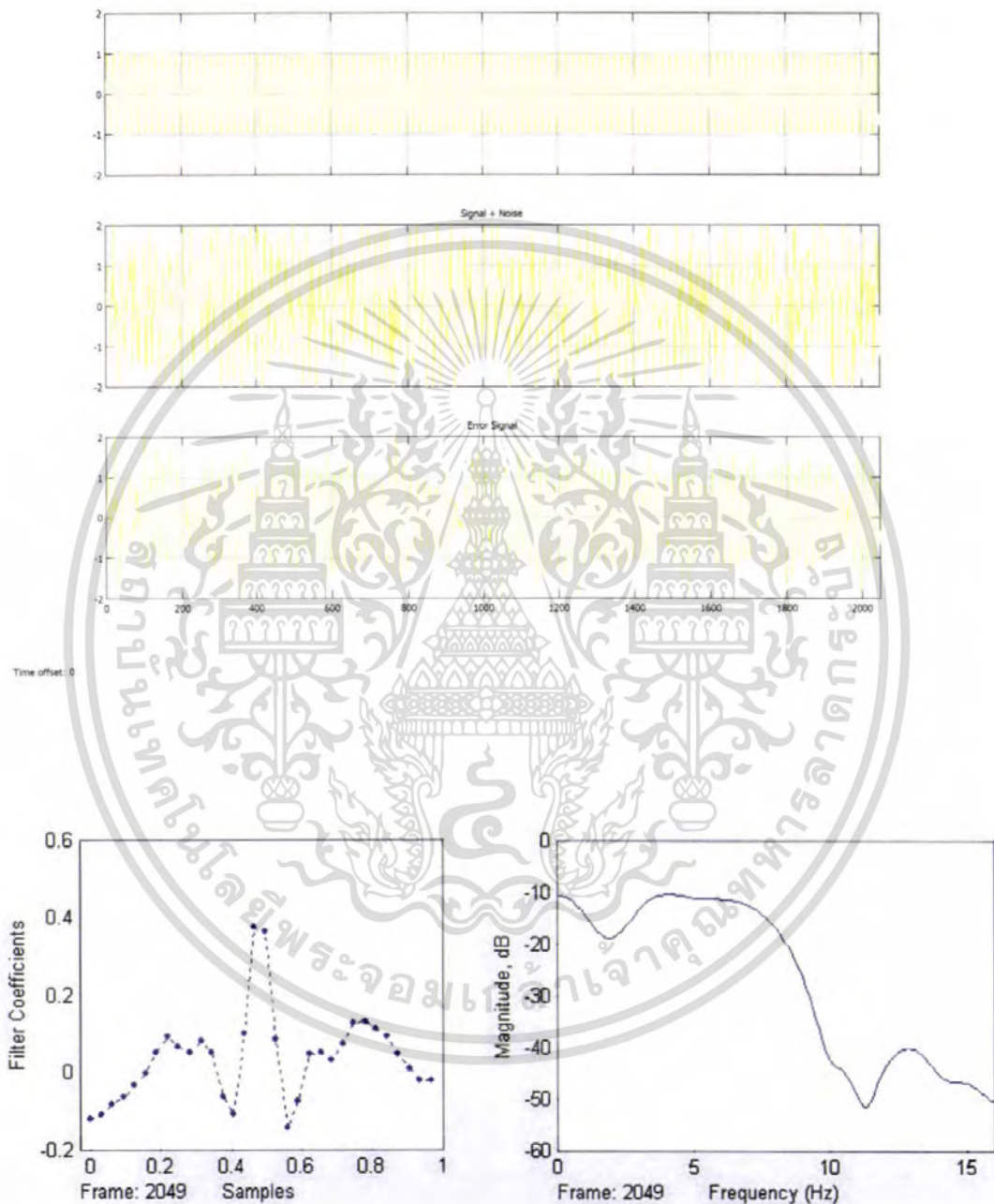
ที่ FIR length 32, step-size 0.05;



รูปที่ 4.18 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 32, step-size 0.05;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

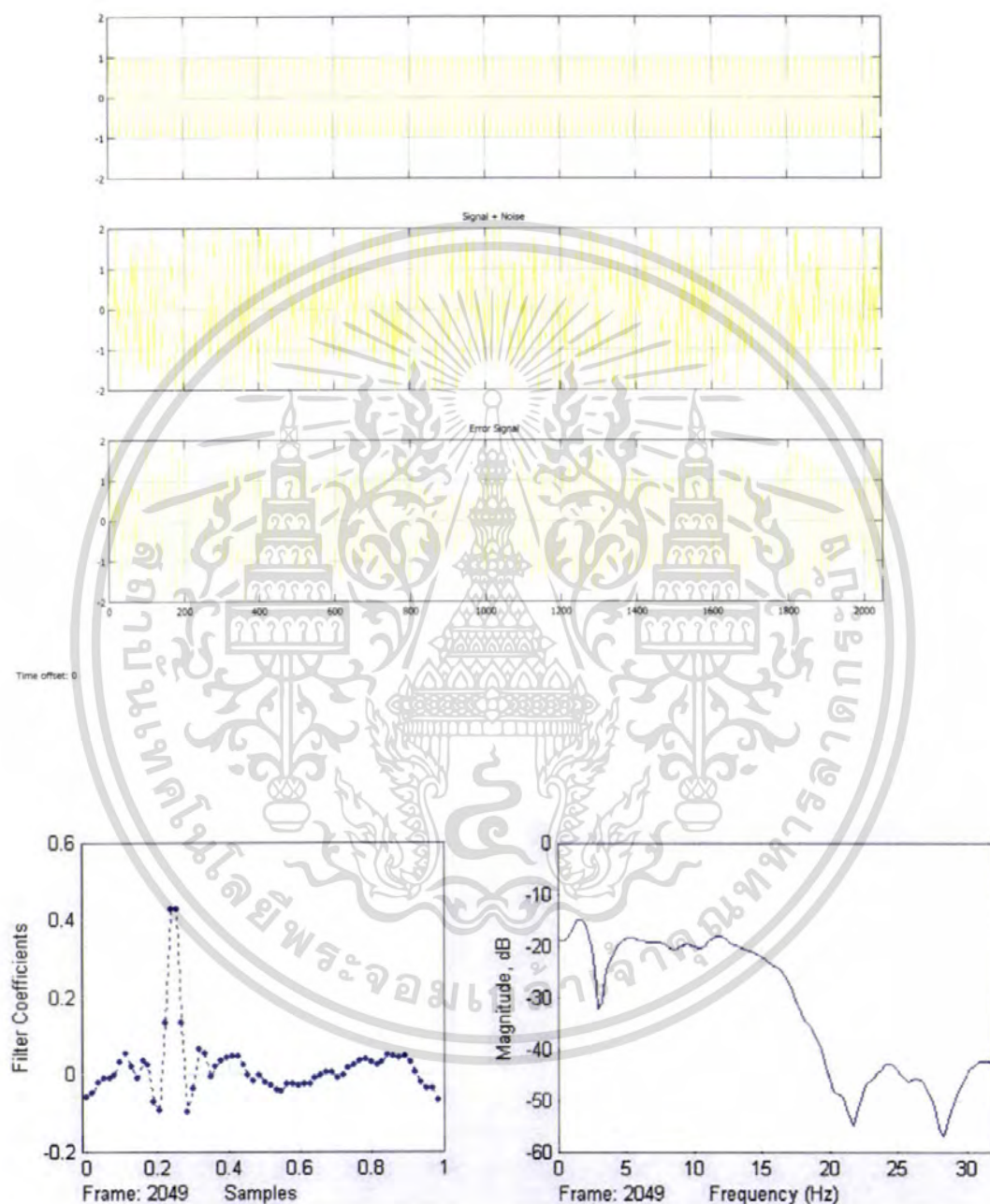
ที่ FIR length 32, step-size 0.5;



รูปที่ 4.19 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 32, step-size 0.5;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

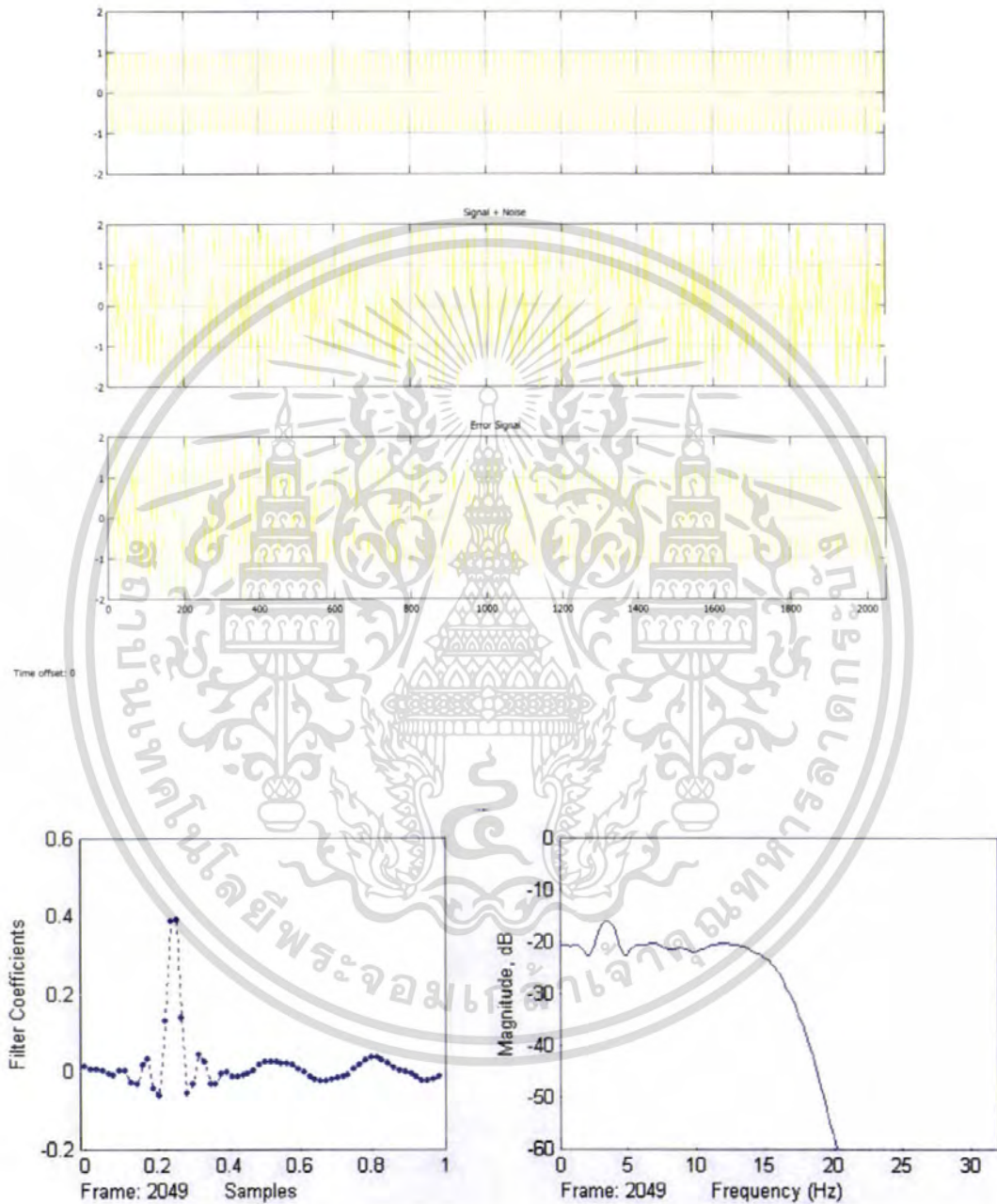
ที่ FIR length 64, step-size 0.5;



รูปที่ 4.20 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 64, step-size 0.5;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ FIR length 64, step-size 0.05;



รูปที่ 4.21 แสดงผลที่ได้จากการกรองสัญญาณที่ FIR 64, step-size 0.05;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองจะเห็นว่าการใช้ค่า Step-size, FIR length ที่แตกต่างกันส่งผลให้ การลู่เข้า (Convergence) มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ ถ้าค่า step-size มาก จะลู่เข้าเร็วแต่มีความเสถียรต่ำ สัญญาณจะค่อนข้างแกว่ง แต่ถ้าค่า step-size น้อยจะทำให้ลู่เข้าช้าแต่มีความเสถียรสูงกว่า



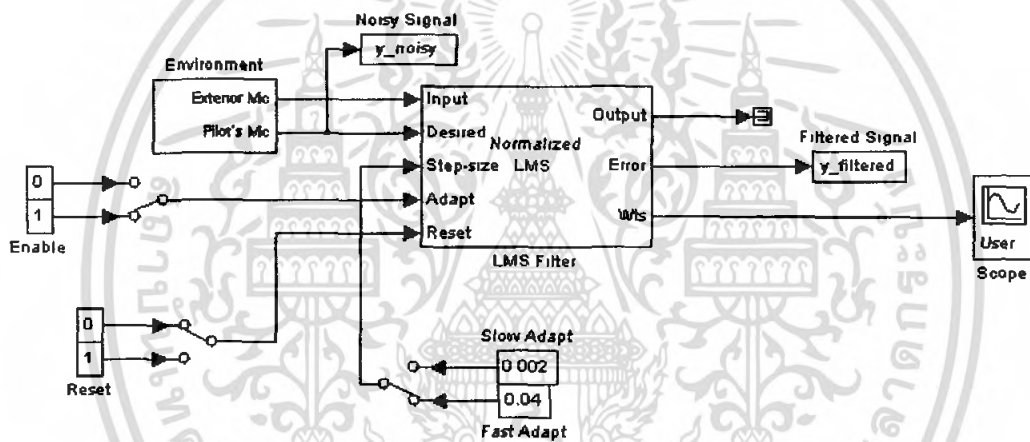
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

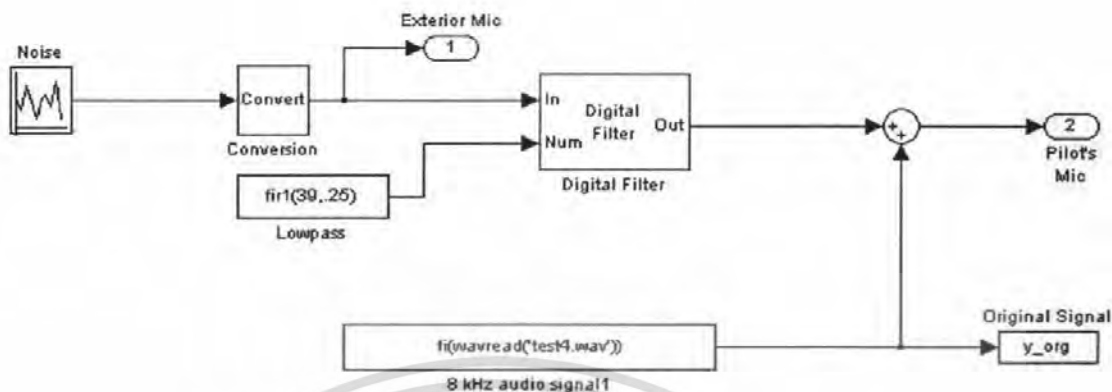
ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองที่มาจากโปรแกรม แมทเล็บ-ซิมมูลิงค์ โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปแบบของภาพกราฟิก

ตัวอย่างรูปแบบของ ซิมมูลิงค์ ที่จะใช้ในการลดสัญญาณสะท้อนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการจำลองสัญญาณรบกวนของระบบขึ้นมา



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างรูปแบบของซิมมูลิงค์ที่จะใช้ในการลดสัญญาณสะท้อน

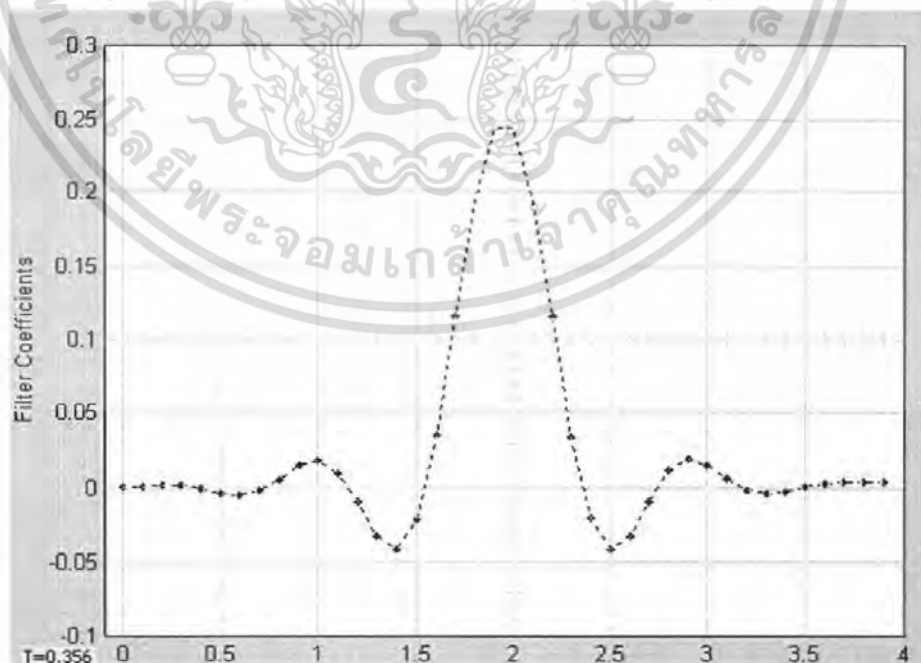
จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่ามียุทธศาสตร์ในการสร้างสัญญาณรบกวน บล็อกของ อะแดปทีฟฟิลเตอร์แบบอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์บล็อกที่ใช้รับค่าจากการจำลอง และบล็อกแสดงผล ซึ่งในบล็อกที่ใช้สร้างสัญญาณรบกวนมีระบบย่อย ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 บล็อกที่ใช้สร้างสัญญาณรบกวน

## 5.1 ผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) ด้วยอัลกอริทึมแบบตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด

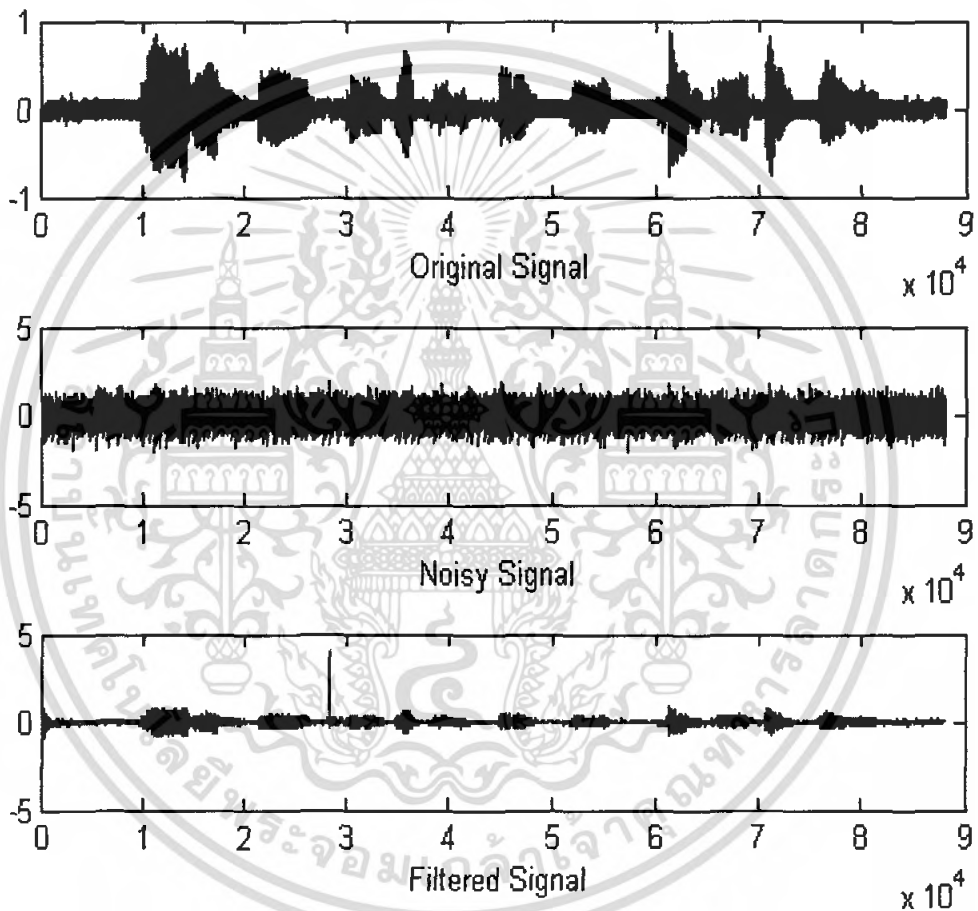
### 5.1.1 ผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม ที่ เสาดปไซค์ 0.002



รูปที่ 5.3 แสดงผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม ที่ เสาดปไซค์ 0.002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะพบว่า เวลาที่ อัลกอริทึม ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ใช้ในการลู่เข้า (Convergent) นั้น เมื่อใช้ค่า เสดปไซค์ 0.002 กับเสียงจริงที่มีข้อมูลประมาณ 90000 samples จะใช้ เวลาประมาณ 0.3 วินาที

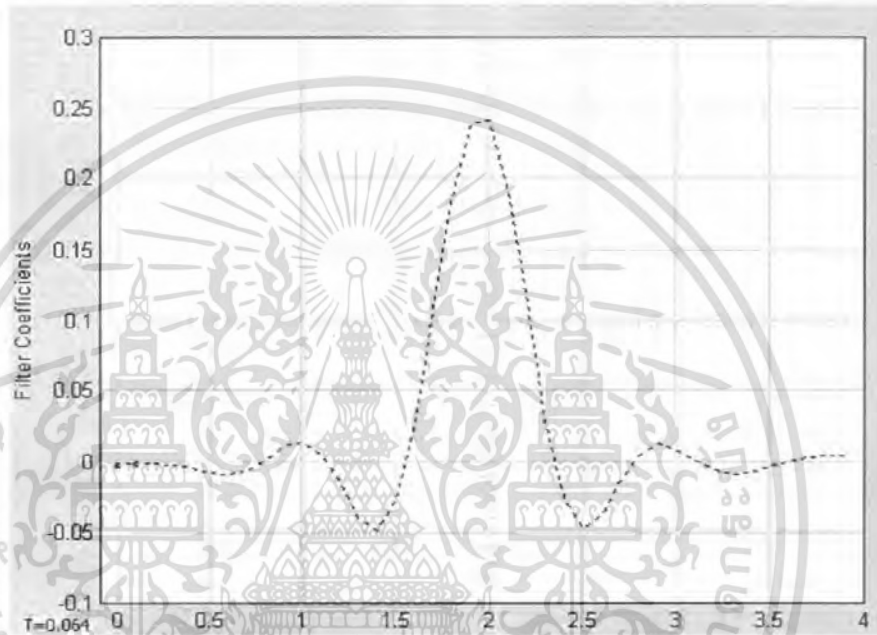


รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน-สัญญาณที่ลด สัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ เสดปไซค์ 0.002 (LMS)

จากรูป สัญญาณที่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนแล้วจะมีความชัดเจนน้อยลงเพราะสัญญาณ ส่วนหนึ่งถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสัญญาณรบกวนนั้นด้วย และจะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้ เสดปไซค์ ที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.002 ใน อัลกอริทึม ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด เวลาที่ใช้ในการลู่อู่เข้าถึงจุดที่ สัญญาณสะท้อนลดลงจนสัญญาณชัดเจนนั้น ใช้เวลาไม่มาก และสัญญาณที่ได้ยังไม่ชัดเจนมากนัก

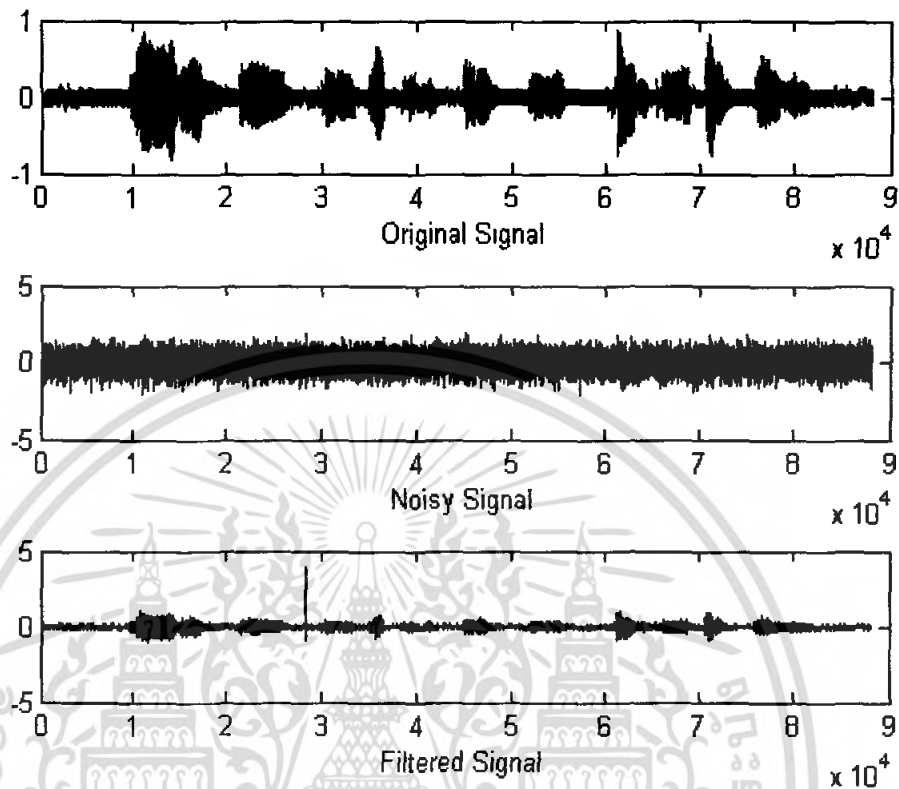
### 5.1.2 ผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม ที่ เสตปไซค์ 0.01



รูปที่ 5.5 แสดงผลจาก ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดอัลกอริทึม ที่ เสตปไซค์ 0.01

จากรูปจะพบว่า เวลาที่ อัลกอริทึม ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ใช้ในการลู่อู่เข้า นั้น เมื่อใช้ค่า เสตปไซค์ 0.01 กับเสียงจริงที่มีข้อมูลประมาณ 90000 samples จะใช้เวลาประมาณ 0.06 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน-สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ เสดปไซค์ 0.01 (LMS)

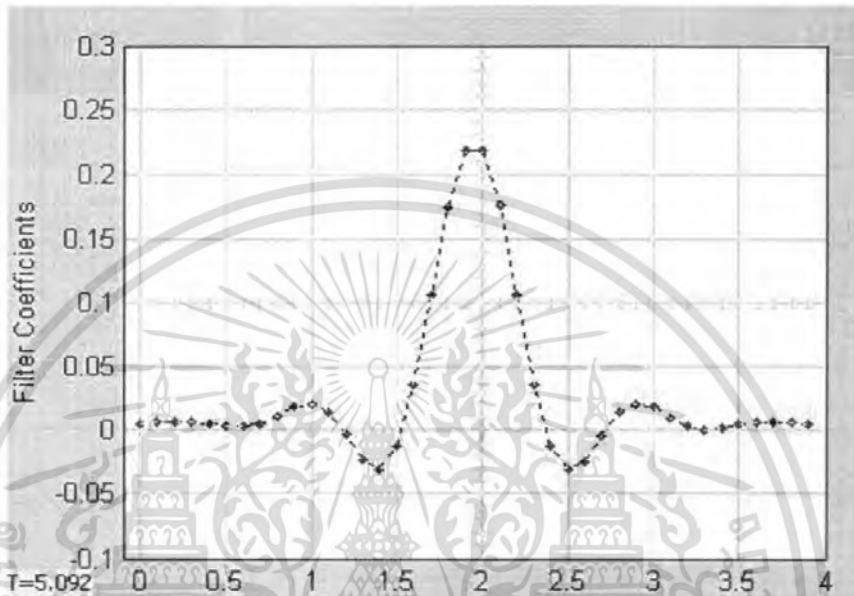
จากรูป สัญญาณที่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนแล้วจะมีความชัดเจนน้อยลงเพราะสัญญาณส่วนหนึ่งถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสัญญาณรบกวนนั้นด้วย และจะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้ เสดปไซค์ที่ 0.01 ในอัลกอริทึม ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด เวลาที่ใช้ในการลู่อู่เข้าถึงจุดที่สัญญาณสะท้อนลดลงจนสัญญาณชัดเจนนั้นใช้เวลารวดเร็วมาก แต่สัญญาณที่ได้ไม่ชัดเจน

## 5.2 ผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) ด้วยอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

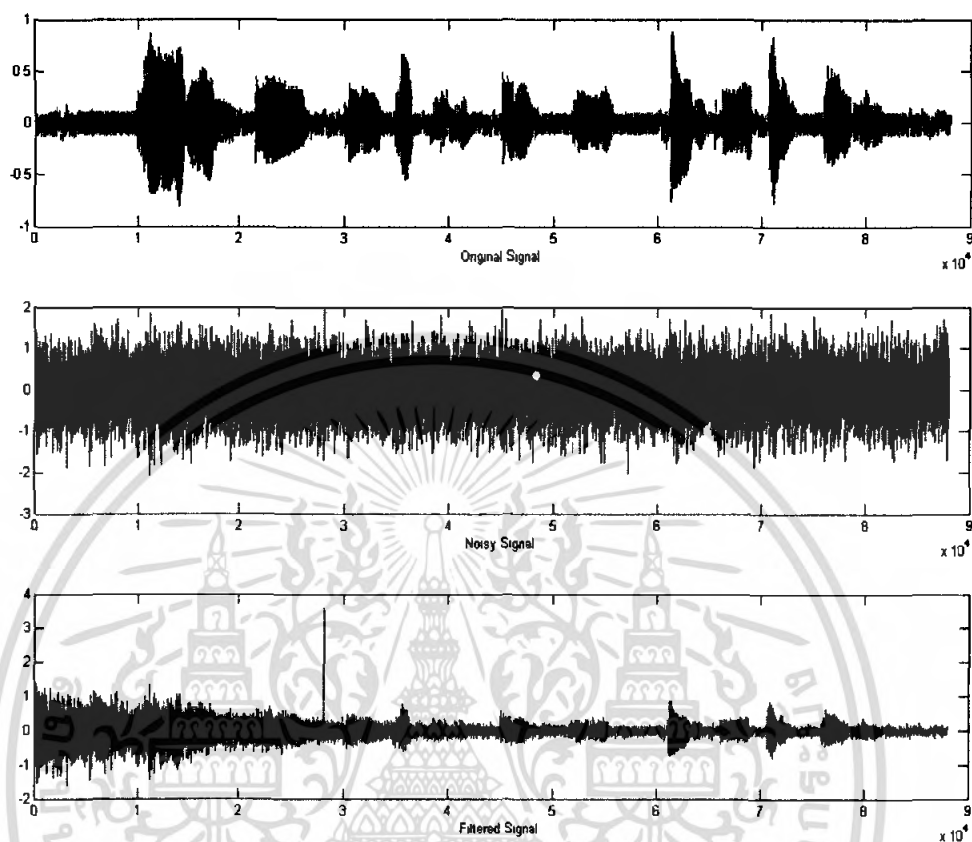
### 5.2.1 ผลจากอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์อัลกอริทึม ที่ สเตปไซค์

0.002



รูปที่ 5.7 ผลของการปรับค่าที่ สเตปไซค์ 0.002 (nLMS)

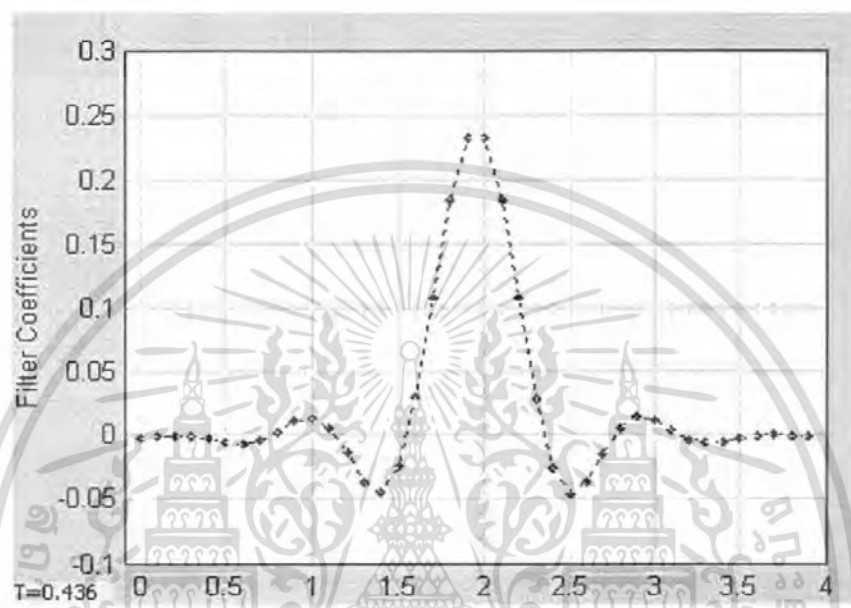
จากรูปจะพบว่า เวลาที่ อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ใช้ในการลู่เข้า นั้น เมื่อใช้ค่า สเตปไซค์ 0.002 กับเสียงจริงที่มีข้อมูลประมาณ 90000 samples จะใช้เวลาประมาณ 5 วินาที



รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน-สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ เสดปไซค์ 0.002 (nLMS)

จากรูป 5.4 สัญญาณที่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนแล้วจะมีความชัดเจนน้อยลงเพราะสัญญาณส่วนหนึ่งถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสัญญาณรบกวนนั้นด้วย และจะเห็นได้ว่าเมื่อเราใช้ เสดปไซค์ที่ 0.002 ใน อัลกอริทึมอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์เวลาที่ใช้ในการลู่เข้า ถึงจุดที่สัญญาณสะท้อนลดลงจนสัญญาณชัดเจนนั้นใช้เวลาค่อนข้างมาก แต่จะได้สัญญาณที่ค่อนข้างชัดตามทฤษฎี

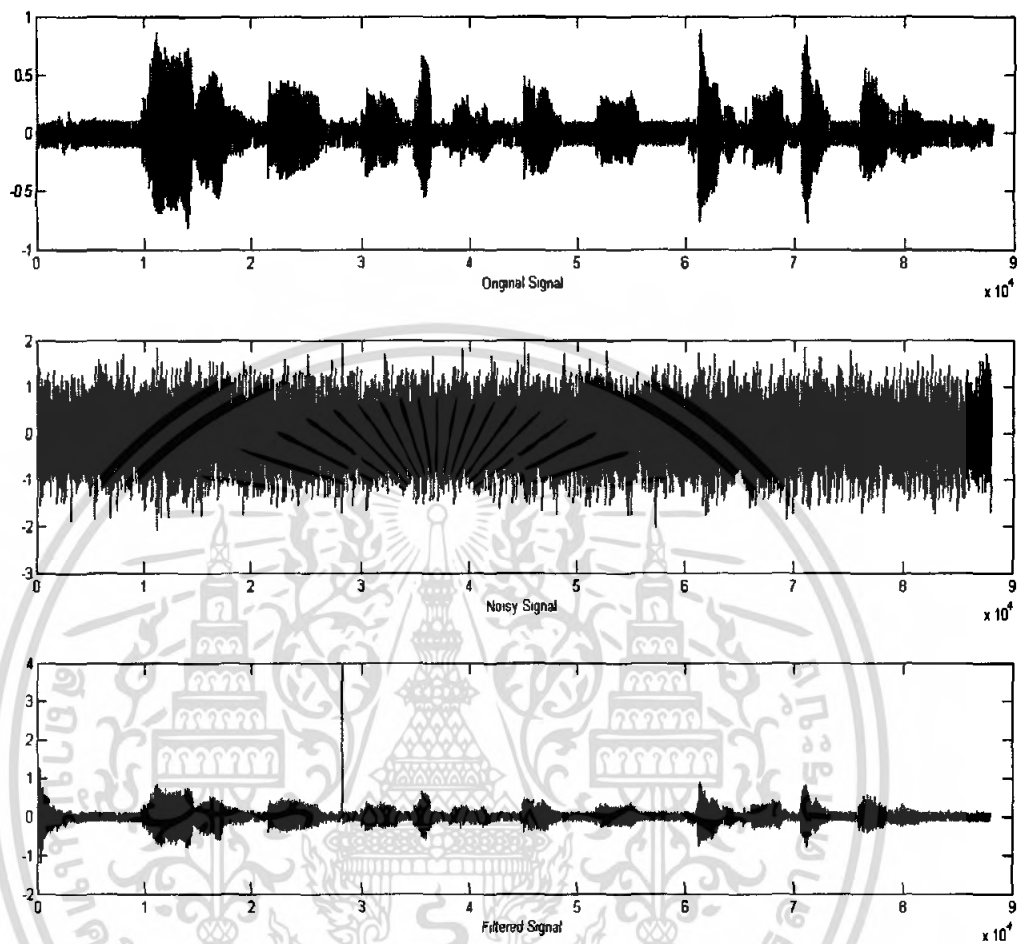
### 5.2.2 ผลจากอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์อัลกอริทึม ที่ สเตปไซค์ 0.04



รูปที่ 5.9 ผลของการปรับค่าที่ สเตปไซค์ 0.04 (nLMS)

จากรูปจะพบว่า เวลาที่ อัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ใช้ในการลู่เข้า (Convergent) นั้น เมื่อใช้ค่า สเตปไซค์ 0.04 กับเสียงจริงที่มีข้อมูลประมาณ 90000 samples จะใช้เวลาประมาณ 0.4 วินาที เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบของ สัญญาณต้นฉบับ-สัญญาณที่มีสัญญาณสะท้อน-สัญญาณที่ลดสัญญาณสะท้อนแล้ว ที่ เสดปไซค์ 0.04 (nLMS)

จากภาพ จะพบว่า สัญญาณที่ผ่านการลดสัญญาณรบกวนแล้วจะมีความชัดเจนน้อยลง เพราะส่วนหนึ่งถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสัญญาณรบกวนนั้นด้วย และจะเห็น ได้ว่าเมื่อเราใช้ เสดปไซค์ที่ 0.04 ใน อัลกอริทึมอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัล โลชเวลตาที่ใช้ในการดูเข้า (Convergent) จะเร็วกว่า เสดปไซค์ 0.002 มาก และสัญญาณที่ได้ค่อนข้างชัดเจนอยู่จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้กับการใช้งานแบบเรียล ไทม์ มากกว่า แต่ทั้งนี้ในการที่จะนำไปใช้งานจริงนั้น ต้อง ขึ้นอยู่กับตัวแปรและสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 ผลจากการทดลอง

จากการทดลอง พบว่าการใช้ ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด อัลกอริทึม นั้น จะให้ผลในการลู่เข้า ของสัญญาณเร็วกว่า อัลกอริทึมแบบอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ แต่สัญญาณที่ได้ยังไม่ชัดเจนเท่ากับการใช้อัลกอริทึมแบบอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ ซึ่งการนำไปใช้นั้นจะต้องคำนึงถึงการปรับเปลี่ยนค่า เสดปไซค์เนื่องจากผลจากการเลือกค่า เสดปไซค์นั้นจะส่งผล โดย ถ้าค่ามากจะทำให้การลู่เข้าเร็ว แต่สัญญาณที่ได้จะไม่ชัดเจน และถ้าค่า เสดปไซค์น้อยก็จะทำให้การลู่เข้า ค่อนข้างช้าแต่จะให้สัญญาณที่ชัดเจนมากกว่า

จากการทดลอง ในแต่ละอัลกอริทึมจะต้องใช้ช่วงของค่า เสดปไซค์ที่ต่างกัน ในกรณีที่ค่า เสดปไซค์มากเกินไปนั้นจะทำให้สัญญาณที่ได้มีค่าผิดพลาดมาก โดยในอัลกอริทึมแบบ ตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ช่วงที่ทำให้สัญญาณยังชัดเจนจะอยู่ที่ประมาณ 0 – 0.01 และในอัลกอริทึมแบบอัลกอริทึมกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์จะอยู่ที่ประมาณ 0 - 1

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อลดสัญญาณสะท้อนในระบบ VoIP ซึ่งในการส่งสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์นั้นจะใช้การส่งไฟล์ที่มีอัตรา (Audio sample rate) ที่ 8 kHz และมีบิตเรต (Bit rates) ที่ 64 kbps เท่านั้น ทำให้บางครั้งการลดสัญญาณรบกวนที่ทำให้สัญญาณเสียงที่ต้องการส่งสูญหายไปบางส่วนด้วยนั้น ไม่มีผล เพราะยังฟังสัญญาณเสียงรู้เรื่องอยู่ แต่ถ้าต้องนำไปใช้กับสภาพแวดล้อมแบบอื่น ควรเลือกใช้ค่า เสดปไซค์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมนั้นๆ

## บทที่ 6

### สรุปและบทวิจารณ์

#### 6.1 บทสรุป

จากการศึกษาและดำเนินการวิเคราะห์โปรแกรมที่สามารถลดสัญญาณสะท้อนในระบบ Voice over IP ทำให้คณะผู้จัดทำเกิดความเข้าใจในระบบการทำงานของระบบวีโอไอพี และ สาเหตุการเกิดสัญญาณสะท้อนขึ้นในระบบวีโอ ไอพี พร้อมวิธีการลดสัญญาณสะท้อนเหล่านั้นจึงสามารถจำแนกลำดับการทำงานได้ดังนี้

- ศึกษาการทำงานของระบบวีโอ ไอพี รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณสะท้อนทั้งทาง ไฟฟ้า (Electric Echo) และสัญญาณสะท้อนทางเสียง (Acoustic Echo)
- ศึกษาเกี่ยวกับมาตรฐาน และอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาสัญญาณสะท้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่นมาตรฐาน ITU G.168 ซึ่งใช้อัลกอริทึมปรับค่าแบบอัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์
- ศึกษาและทดสอบการทำงานโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ โดยเริ่มต้นศึกษาจากบิวต์อินฟังก์ชัน( built in function) ของ แมทแล็บ และทดสอบผลการทำงานโดยการวาดเป็นกราฟและศึกษาความแตกต่างของแต่ละอัลกอริทึมจากกราฟที่วาดได้
- ศึกษาการใช้งานโปรแกรมซิมูลิงค์ (Simulink) เพื่อสร้างบล็อกการทำงานที่สามารถลดสัญญาณสะท้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ง่ายต่อการรับค่า (Input) และแสดงค่า (Output) สัญญาณที่ผ่านการลดสัญญาณสะท้อนแล้ว
- จากการทดลองพบว่าการลดสัญญาณสะท้อนในระบบวีโอ ไอพีนั้น การใช้ตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filters) แบบ อัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดแบบนอร์มัลไลซ์ จะทำให้ได้สัญญาณเสียงที่ผ่านการลดเสียงสะท้อนดีที่สุด ทั้งนี้ในการปรับค่าของตัวกรองปรับค่าได้ การเลือกใช้ค่าเสตปไซส์ จะมีผลต่อการปรับค่าของอัลกอริทึม ในกรณีที่ใช้ค่า เสตปไซส์น้อยจะทำให้การลู่เข้าของสัญญาณค่อนข้างช้าแต่จะให้ความเสถียรของสัญญาณและคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าการใช้ค่า เสตปไซส์ที่มากกว่าที่มีการลู่เข้าที่เร็วกว่า ซึ่งการใช้ค่า เสตปไซส์ในการลดปัญหาสัญญาณสะท้อนนี้ต้องคำนึงการนำไปใช้กับสภาพแวดล้อมแล้วสัญญาณ เช่น ในการสื่อสารแบบเรียลไทม์ ต้องใช้ค่า เสตปไซส์ที่มีการลู่เข้าที่รวดเร็ว และยังคงได้สัญญาณที่ยังสามารถรับฟังรู้เรื่องอยู่

## 6.2 บทวิจารณ์

- หลังจากการที่ได้ลงมือทำโครงการวิจัยนี้ สิ่งที่ผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้า รวมถึงทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ออกมาทำให้ทราบถึงผลกระทบของสัญญาณสะท้อนที่มีในระบบสื่อสารและประโยชน์ในการสร้างวงจรกำจัดสัญญาณสะท้อน โดยวิธีการของตัวกรองปรับค่าได้

## 6.3 ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน

- ปัญหาในการทำความเข้าใจกับอัลกอริทึม เนื่องจากทฤษฎีที่ต้องทำการศึกษาเป็นคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ทำให้การศึกษาเข้าใจได้ยากส่งผลให้การสร้างอัลกอริทึมในบางส่วนมีความผิดพลาดได้

- ปัญหาในส่วนของปรับเปลี่ยนค่ามิวในอัลกอริทึมแบบค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดแบบนอร์มอลไรซ์ ในครั้งแรกที่ยังไม่ได้มีการทำ การแก้ไขโปรแกรมยังให้ผลการทำงานที่ผิดพลาด แต่หลังจากที่ทำการแก้ไขแล้ว โปรแกรมให้ผลการทำงานที่ถูกต้อง

## 6.4 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาศึกษาต่อ

- โปรแกรมต้องสามารถอ่านข้อมูลอินพุท โดยรับเป็นเสียงจริงโดยตรง จากเดิมที่โปรแกรมต้องรับอินพุทโดยการอ่านจากไฟล์เท่านั้น

- พัฒนาโปรแกรมให้ทำงาน ได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้ กับสถานการณ์จริง

- นำไปประยุกต์เพื่อสร้างฮาร์ดแวร์ที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บรรณานุกรม

1. ศ.ดร. วัลลภ สุระกำพลธร, ตุลาคม 2533, “การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
2. ดร. ไพรัช รัชขพงษ์ , กันยายน 2535, “การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ตอนการออกแบบวงจรกรองดิจิทัล”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
3. รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์และวรรรัตน์ ภัทรอมรกุล , เมษายน 2543 “คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส,
4. Vinay K. Ingle and John G. Proakis , “ Digital Signal Processing ” , The Original Bookware Companion Series
5. Steven W. Smith, 2003, “Digital Signal Processing”, Demystifying Technology Series,
6. Saeed V. Vaseghi, 2006, “Advance Digital Signal Processing and Noise Reduction”, Third Edition, John Wiley & Sons, Ltd
7. Haykin, S., 1996, “Adaptive Filter Theory”, 3rd Ed., Prentice-Hall,