สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีเอดีพีซีเอ็ม

Speech compression using ADPCM

โดย

นายเรืองวิทย์ วิบูลสุข

นายสุเมธ ไหนาค

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 61785 27 ก.ค. 2549
วัน,เดือน,ปี.....
b.....
ง.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีเอดีพีซีเอ็ม

Speech compression using ADPCM

โดย

นายเรืองวิทย์ วิบูลสุข 45015069

นายสุเมธ ไหนาค 45015082

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. อัครพล ตรีรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **การบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีเอดีพีซีเอ็ม(ADPCM)**

Speech compression using ADPCM

ผู้จัดทำ

1.	**นายเรืองวิทย์**	**วิบูลสุข**	**45015069**
2.	**นายสุเมธ**	**ไหนาค**	**45015082**

(.....) อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. อัครพล ตรีรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีเอดีพีซีเอ็ม(ADPCM)

Speech compression using ADPCM

โดย นายเรืองวิทย์ วิบูลสุข 45015069
นายสุเมธ ไหนาค 45015082

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.อัครพล ตรีรัตน์

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ทำการศึกษาอัลกอริทึมและโครงสร้างที่ใช้สำหรับการบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีการ ADPCM (Adaptive Difference Pulse Code Modulation) ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ควอนไทซ์เซอร์ (Quantizer) และตัวทำนายสัญญาณ (Predictor) โดยทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี

Abstract

This Project presents the speech codec by ADPCM (Adaptive Difference Pulse Code Modulation) technique. The major components of ADPCM include Quantizer, Predictor and Binary encoder. In this project, we utilize MATLAB in order to obtain all the relevant results for every parts in designed ADPCM codec. Finally, all the results are investigated and made direct comparison to the theory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของหัวข้อปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
1.4 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 การประมวลผลสัญญาณเสียง	2
2.2 การสุ่มสัญญาณ (Sampling)	2
2.3 การควอนไทซ์แบบยูนิฟอร์ม (Uniform Quantization)	4
2.4 การควอนไทซ์แบบปรับตัว (Adaptive Quantization)	7
2.5 การมอดูเลตรหัสพัลส์แบบใช้ค่าความแตกต่างสัญญาณ (Differential Pulse Code Modulation)	11
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1การออกแบบฟังก์ชั่นการทำงานของดีพีซีเอ็ม และเอดีพีซีเอ็ม	20
3.2 การออกแบบควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม และแบบปรับตัว	21
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 จำลองการทำงานของฟังก์ชั่นการทำนายด้วยโปรแกรม MATLAB	23
4.2 จำลองการทำงานของควอนไทซ์เซอร์	42
4.3 จำลองการทำงานของระบบดีพีซีอ็ม และเอดีพีซีเอ็ม	43
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	71
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปแบบสัญญาณเสียง 2
รูปที่ 2.2 สเปกตรัมสัญญาณสุ่ม 3
รูปที่ 2.3 ลำดับสัญญาณที่ผ่านการสุ่มด้วยความถี่ไนควิสต์ 3
รูปที่ 2.4 ระดับการควอนไทซ์ 4
รูปที่ 2.5 แบบจำลองของควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม 5
รูปที่ 2.6 ความผิพลาดการควอนไทซ์ของควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม
สำหรับสัญญาณแบบยูนิฟอร์ม 6
รูปที่ 2.7 Jayant Quantizer 8
รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมแนวคิดพื้นฐานของดีพีซีเอ็ม 11
รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่ายของดีพีซีเอ็ม 13
รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของดีพีซีเอ็ม 14
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของเอดีพีซีเอ็ม 16
รูปที่ 2.12 ผลต่างสัญญาณกำลังสองเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวทำนายอันดับ 1 17
รูปที่ 2.13 ผลต่างสัญญาณกำลังสองเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวทำนายอันดับ N 18
รูปที่ 3.1 แบบจำลองควอนไทซ์เซอร์ตามสมมติฐาน 21
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของดีพีซีเอ็มที่ใช้ในการทดลอง 23
รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของเอดีพีซีเอ็มที่ใช้ในการทดลอง 23
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3 24
รูปที่ 4.4 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 24
รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 25
รูปที่ 4.6 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3 25
รูปที่ 4.7 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง ดีพีซีเอ็ม อันดับ 10 27
รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 27
รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 28
รูปที่ 4.10 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 10 28
รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10 30
รูปที่ 4.12 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 30
รูปที่ 4.13 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 31
รูปที่ 4.14 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55 33
รูปที่ 4.16 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 33
รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 34
รูปที่ 4.18 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55 34
รูปที่ 4.19 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 36
รูปที่ 4.20 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 36
รูปที่ 4.21 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 37
รูปที่ 4.22 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 37
รูปที่ 4.23 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 39
รูปที่ 4.24 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 39
รูปที่ 4.25 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 40
รูปที่ 4.26 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 40
รูปที่ 4.27 บล็อกไดอะแกรมของ ดีพีซีเอ็ม 43
รูปที่ 4.28 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 1 ระบบดีพีซีเอ็ม 44
รูปที่ 4.29 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 44
รูปที่ 4.30 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 45
รูปที่ 4.31 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม 45
รูปที่ 4.32 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 2 ระบบ ดีพีซีเอ็ม 46
รูปที่ 4.33 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 46
รูปที่ 4.34 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 47
รูปที่ 4.35 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย 47
รูปที่ 4.36 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 3 ระบบ ดีพีซีเอ็ม 48
รูปที่ 4.37 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 48
รูปที่ 4.38 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 49
รูปที่ 4.39 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม 49
รูปที่ 4.40 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 1 ระบบ ดีพีซีเอ็ม 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.41 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 50
รูปที่ 4.42 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 51
รูปที่ 4.43 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม 51
รูปที่ 4.44 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 2 ระบบ ดีพีซีเอ็ม 52
รูปที่ 4.45 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 52
รูปที่ 4.46 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 53
รูปที่ 4.47 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม 53
รูปที่ 4.48 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 3 ระบบ ดีพีซีเอ็ม 54
รูปที่ 4.49 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 54
รูปที่ 4.45 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 55
รูปที่ 4.51 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม 55
รูปที่ 4.52 บล็อกไดอะแกรมของ เอดีพีซีเอ็ม 56
รูปที่ 4.53 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 1 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 57
รูปที่ 4.54 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 57
รูปที่ 4.55 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 58
รูปที่ 4.56 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 58
รูปที่ 4.57 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 2 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 59
รูปที่ 4.58 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 59
รูปที่ 4.59 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 60
รูปที่ 4.60 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 60
รูปที่ 4.61 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 3 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 61
รูปที่ 4.62 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 61
รูปที่ 4.63 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 62
รูปที่ 4.64 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 62
รูปที่ 4.65 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 1 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 63
รูปที่ 4.66 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 63
รูปที่ 4.67 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 64
รูปที่ 4.68 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 64
รูปที่ 4.69 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 2 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 65
รูปที่ 4.70 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 65
รูปที่ 4.71 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.72 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 66
รูปที่ 4.73 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 3 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม 67
รูปที่ 4.74 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส 67
รูปที่ 4.75 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส 68
รูปที่ 4.76 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 กระบวนการของ Jayant Quantizer 9

ตารางที่ 3.1 เซทตัวคูณสำหรับควอนไทซ์เซอร์ที่ใช้ในการทดลอง 22

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของดีพีซีเอ็ม อันดับ 3 26

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของดีพีซีเอ็ม อันดับ 10 29

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่นอันดับ 10 32

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส
อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55 35

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส
อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 38

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส
อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1 41

ตาราง 4.7 เปรียบเทียบค่าคิวเอสเอ็นอาร์ของควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวเมื่อเปลี่ยนเซทตัวคูณ 42

ตาราง 4.8 เปรียบเทียบคิวเอสเอ็นอาร์ระหว่างควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม และแบบปรับตัว 42

ตาราง 4.9 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และเอดีพีซีเอ็มขนาด 2 บิต 45

ตาราง 4.10 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และเอดีพีซีเอ็ม ขนาด 3 บิต 45

ตาราง 4.11 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และเอดีพีซีเอ็ม ขนาด 4 บิต 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของหัวข้อปริญญานิพนธ์

การสื่อสารด้วยเสียงนั้นเริ่มมีการพัฒนาขึ้นมาจากระบบอนาล็อก และจากการศึกษาพบว่าสัญญาณอนาล็อกนั้นมีภูมิต้านทานต่อสัญญาณรบกวนที่ไม่ดี จึงมีการคิดค้นวิธีที่จะทำให้สัญญาณมีภูมิต้านต่อสัญญาณรบกวนที่ดีขึ้น นั่นก็คือการนำเอาสัญญาณอนาล็อกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล และยังเป็นผลดีที่ทำให้เราสามารถส่งสัญญาณเสียงที่อยู่ในรูปแบบดิจิตอลผ่านทางอินเตอร์เน็ต ซึ่งเป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยมอย่างมาก และเนื่องจากความต้องการในการสื่อสารนั้นมากขึ้น แต่ความกว้างของช่องทางการสื่อสารเรายังทำให้เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัดไม่ได้ จึงมีการคิดค้นวิธีการที่จะบีบอัดข้อมูลเสียงนั้นให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะส่งผลให้เราสามารถใช้ทรัพยากรในการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ในการบีบอัดข้อมูลเสียงนั้นมีวิธีการอยู่หลายวิธี เช่น มอดูเลตแบบเดลต้า (Delta Modulation) ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น (Differential Pulse Code Modulation) อะแดปทีฟดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) และซีอีแอลพี (Code Excited Linear Predictive Coding) ซึ่งแต่ละวิธีนั้นจะมีทั้งข้อดีและข้อด้อยรวมถึงความซับซ้อนแตกต่างกันไป

ในปริญญานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาการบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยวิธีการอะแดปทีฟดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่นที่เรียกย่อว่า เอดีพีซีเอ็ม เพราะเป็นวิธีการที่ให้ผลของการบีบอัดที่ดีและไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยจำลองการทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.1.1 เพื่อศึกษาหลักการปรับตัวของอัลกอริทึมที่ใช้

1.1.2 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้วงจรกรองแบบปรับตัวได้เป็นวงจรทำนายแบบปรับตัวได้

1.1.3 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้งานการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยกระบวนการอะแดปทีฟดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น ซึ่งมีขั้นตอนคือการจำลองการทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB

1.4 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในการออกแบบและการสร้างวงจรบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยกระบวนการดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น (ดีพีซีเอ็ม) และ อะแดปทีฟดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โค้ดมอดูเลชั่น (เอดีพีซีเอ็ม)

บทที่ 3 กล่าวถึงการคำนวณและการสร้าง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของการจำลองบน MATLAB

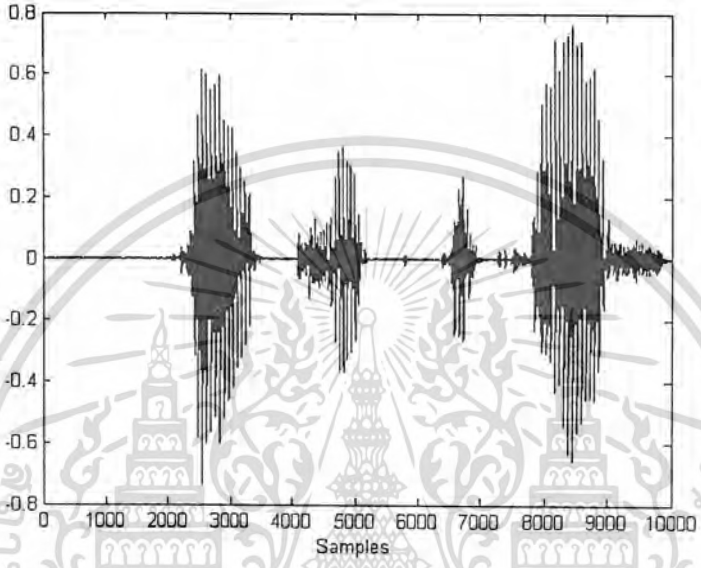
บทที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ วิจารณ์ และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การประมวลผลสัญญาณเสียง

สัญญาณเสียงเป็นสัญญาณต่อเนื่องทั้งแอมปลิจูดและเวลา (Continuous Signal) หรือเรียกอีกอย่างว่าสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal)



รูปที่ 2.1 รูปแบบสัญญาณเสียง

การนำสัญญาณเสียงมาประมวลผลทางด้านดิจิตอลนั้น ต้องทำการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete–time) ด้วยการสุ่มข้อมูลของสัญญาณ (Sampling) ณ เวลาต่างๆ โดยให้ความห่างของสัญญาณที่สุ่มออกมามีความห่างที่เท่ากันและเหมาะสม ข้อมูลที่ทำการสุ่มออกมานั้นก็เพียงพอที่จะเป็นตัวแทนของสัญญาณต้นฉบับที่จะนำไปประมวลผลทางดิจิตอล

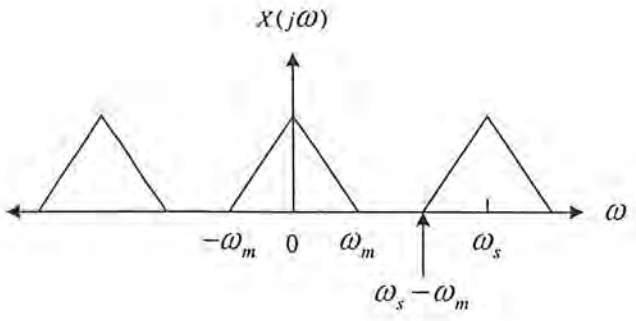
2.2 การสุ่มสัญญาณ (Sampling)

สัญญาณที่เราต้องการสุ่มมีความถี่สูงสุด ω_M เพื่อให้ได้ตัวอย่างสัญญาณที่จะเป็นข้อมูลในการประมวลผล จะต้องใช้ความถี่ในการสุ่ม ω_s เท่ากับหรือมากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุด ω_M

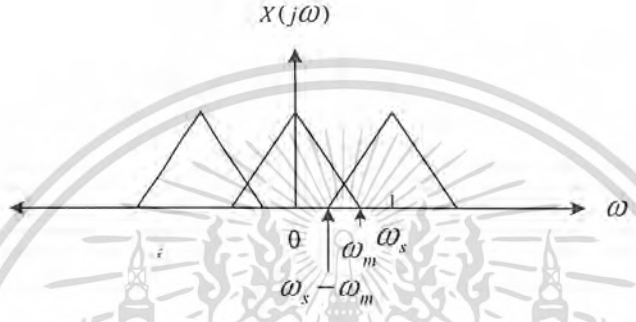
$$\omega_s \geq 2\omega_m \tag{2.1}$$

ความถี่ ω_s นี้มีชื่อเรียกว่าความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency) ซึ่งความถี่ไนควิสต์นี้จะทำให้สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณที่สุ่มได้ไม่เกิดเอเลียสซิง (Aliasing) [1] [2] ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

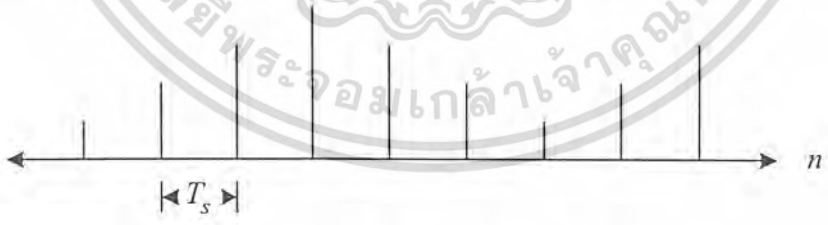


(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วย $\omega_s > 2\omega_m$

(ข) สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกสุ่มด้วย $\omega_s < 2\omega_m$

รูปที่ 2.2 (ข) จะเห็นว่าถ้าใช้ความถี่ในการสุ่มน้อยกว่าความถี่ไนควิสต์แล้วสเปกตรัมของสัญญาณที่สุ่มได้จะเกิดเอเลียสซิง



รูปที่ 2.3 ลำดับสัญญาณที่ผ่านการสุ่มด้วยความถี่ไนควิสต์

สัญญาณเสียงที่ใช้สื่อสารในระบบโทรศัพท์มีความถี่อยู่ในช่วง 300-34000 เฮิรตซ์ ดังนั้นความถี่ในการสุ่มทางทฤษฎีจะต้องไม่น้อยกว่า 6800 เฮิรตซ์ สำหรับในทางปฏิบัติ ITU– T แนะนำให้ใช้ความถี่ 8000 เฮิรตซ์ ตัวอย่างสัญญาณที่สุ่มมาได้จะมีช่วงห่างกัน T_s เท่ากับ 125 ไมโครเซก สัญญาณที่สุ่มมานี้ถูกมองอยู่ในรูปของลำดับสัญญาณ (Sequence) ที่จะนำไปประมวลผลต่อไป ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

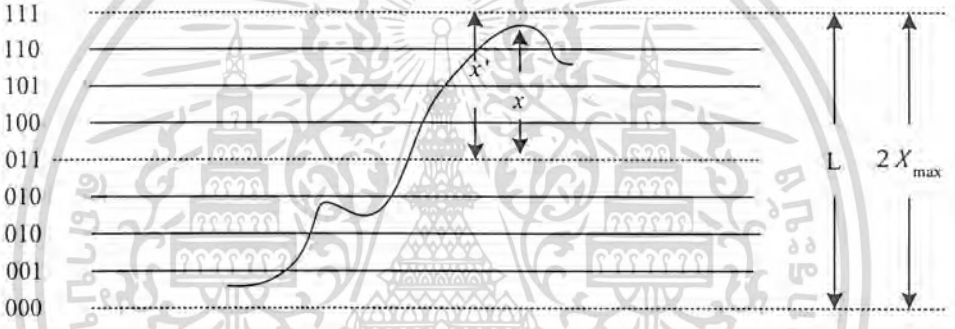
2.3 การควอนไทซ์แบบยูนิฟอร์ม (Uniform Quantization)

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนบิตกับจำนวนระดับการควอนไทซ์

ในการจัดหาจำนวนบิตในการแทนสัญญาณ หรือระดับการควอนไทซ์นั้นมาจากเลขฐานสอง จะมีรูปแบบที่ไม่ซ้ำกันอยู่ $2^{R_{bit}}$ รูปแบบ เช่น 2^3 มีรูปแบบที่เป็นไปได้คือ {000 001 010 011 100 101 110 111} จึงเกิดแนวคิดในการนำรูปแบบที่เกิดขึ้นไม่ซ้ำกันนี้มาประยุกต์ใช้ในการควอนไทซ์ดังรูปที่ 2.4 โดยแทนรูปแบบของเลขฐานสองลงในแต่ละระดับ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนบิตกับจำนวนระดับการควอนไทซ์ คือ

$$2^{R_{bit}} = L \qquad \text{ระดับ} \qquad (2.2)$$

การเลือกจำนวน R_{bit} ต่อระดับการควอนไทซ์นั้นขึ้นอยู่กับการเกิดความผิดพลาดจากการควอนไทซ์ (Quantization Error) ที่เรายอมให้เกิดขึ้น

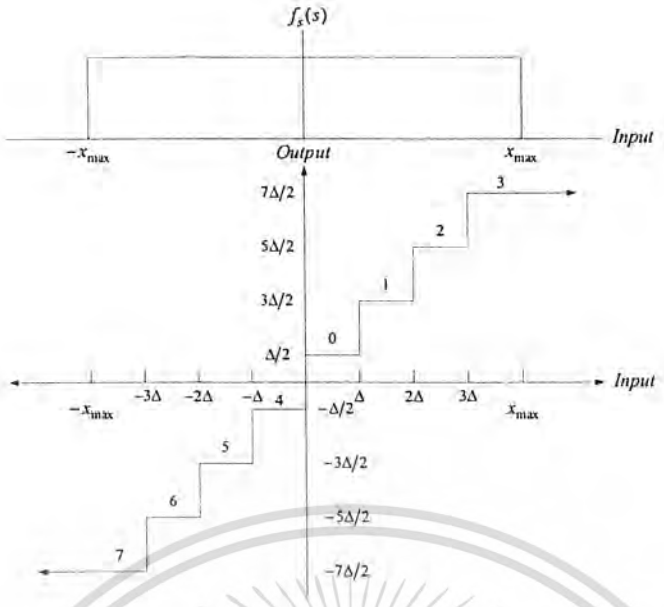


รูปที่ 2.4 ระดับการควอนไทซ์

2.3.2 การควอนไทซ์แบบยูนิฟอร์มสำหรับสัญญาณแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Quantization of a Uniformly Distributed Source)

การควอนไทซ์สัญญาณนั้นจะเกิดความผิดพลาดจากการปัดค่าขึ้นหรือลง ซึ่งค่าความผิดพลาดการควอนไทซ์ถือได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวนจากการควอนไทซ์ [1] ในการออกแบบควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์มจะอยู่บนสมมติฐานว่าสัญญาณอินพุทนั้นมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองตามสมมติฐานดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 ถ้าสัญญาณอินพุทมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มในช่วง $(-x_{max}, x_{max})$ นั่นหมายความว่าเราสามารถหาความกว้างของแต่ละระดับการควอนไทซ์ (Step size, Δ) ให้มีขนาดเท่ากันได้

$$\Delta = \frac{2x_{max}}{L} \tag{2.3}$$

สำหรับสัญญาณที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ (Mean, η_s) ได้

$$f_s(s) = \frac{1}{2x_{max}}$$

$$\eta_s = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} s f_s(s) ds$$

$$= 0 \tag{2.4}$$

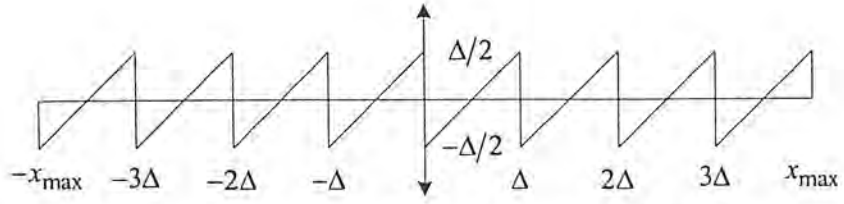
จากสมการ (2.4) จะเห็นว่าในการหาค่าความแปรปรวน (Variance) ก็คือการหาโมเมนต์อันดับที่สอง (Second moment) ของสัญญาณนั่นเอง

$$\sigma_s^2 = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} s^2 f_s(s) ds$$

$$= \frac{x_{max}^2}{3} \tag{2.5}$$

สำหรับค่าความผิดพลาดจากการควอนไทซ์มีค่าเป็น $e = x - Q(x)$ และจากรูปที่ 2.5 เราสามารถเขียนกราฟการเกิดความผิดพลาดการควอนไทซ์ได้ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความผิดพลาดการควอนไทซ์ของควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์มสำหรับสัญญาณแบบยูนิฟอร์ม

เนื่องจากสัญญาณอินพุทมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม ค่าความผิดพลาดจากการควอนไทซ์ก็จะมีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์มในช่วง $(-\frac{\Delta}{2},\frac{\Delta}{2})$ เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในช่วง $(-\frac{\Delta}{2},\frac{\Delta}{2})$ ได้

$$f_e(e)=\frac{1}{\Delta}$$

$$\eta_e=\int_{\frac{-x_{max}}{L}}^{\frac{x_{max}}{L}} e f_e(e)de$$

$$=0 \qquad (2.6)$$

จากสมการ (2.6) สามารถหาค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดได้

$$\sigma_e^2=\int_{\frac{-x_{max}}{L}}^{\frac{x_{max}}{L}} e^2 f_e(e)de$$

$$=\frac{x_{max}^2}{3L^2} \qquad (2.7)$$

จากสมการ (2.5) และ (2.7) เราสามารถหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากการควอนไทซ์ได้

$$QSNR\ (dB)=10\log\left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_e^2}\right)$$

$$=10\log\left(\frac{x_{max}^2}{3}\cdot\frac{3L^2}{x_{max}^2}\right)$$

$$=6.02R_{bit} \qquad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.8) แสดงให้เห็นว่าถ้าเราเพิ่มจำนวนบิตในการเป็นตัวแทนระดับการควอนไทซ์ (ระดับสัญญาณที่ผ่านการควอนไทซ์แล้ว) จะได้ค่าคิวเอสเอ็นอาร์เพิ่มขึ้น 6.02 dB เท่าและสมการ (2.8) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อสัญญาณอินพุทมีการกระจายแบบ ยูนิฟอร์มเท่านั้นเมื่อใดที่เราป้อนสัญญาณที่มีการกระจายในรูปแบบอื่นให้ควอนไทซ์เซอร์แบบนี้แล้ว จะทำให้ค่าคิวเอสเอ็นอาร์น้อยลงซึ่งเกิดจากความไม่สัมพันธ์กันระหว่างการกระจายของสัญญาณกับการกระจายตามสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบควอนไทซ์เซอร์ (Mismatch Effect) [3]

2.4 การควอนไทซ์แบบปรับตัว (Adaptive Quantization)

ในการแก้ปัญหาความไม่สัมพันธ์กันระหว่างการกระจายของสัญญาณอินพุทกับการกระจายตามสมมติฐานนั้นมีหลายวิธีและในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาอะแด็บทีฟควอนไทซ์เซอร์ การปรับตัวของควอนไทซ์เซอร์นั้นจำแนกออกเป็น 2 แบบ คือการปรับตัวแบบป้อนไปข้างหน้า (Forward Adaptive Quantization) และการปรับตัวแบบป้อนกลับ (Backward Adaptive Quantization) ในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการปรับตัวแบบป้อนกลับ ซึ่งมีหลักการคือ ถ้าเราสังเกตว่าเกิดการตกของสัญญาณอินพุทในระดับการควอนไทซ์ที่ควรจะเป็นหลายครั้ง นั่นแสดงว่าสัญญาณอินพุทมีการกระจายที่สอดคล้องกับการกระจายของควอนไทซ์เซอร์ และถ้าสัญญาณอินพุทตกอยู่ในระดับที่ไม่ควรจะเป็นหลายครั้งจะกล่าวได้ว่าสัญญาณอินพุทนั้นมีการกระจายที่ต่างไปจากการกระจายของควอนไทซ์เซอร์

ถ้าหากขนาดของระดับการควอนไทซ์เล็กกว่าที่ควรจะเป็นจะทำให้โอกาสที่สัญญาณอินพุทตกนอกระดับที่ควรจะเป็นนั้นก็มีมากขึ้น แต่ถ้าหากขนาดระดับการควอนไทซ์ใหญ่กว่าที่ควรจะเป็นจะทำให้สัญญาณอินพุทตกอยู่ในระดับที่ไม่ควรตกมากครั้งขึ้นเช่นกัน ดังนั้นถ้าสังเกตเห็นว่าสัญญาณอินพุทตกอยู่ภายนอกระดับที่ควรจะเป็นหลายครั้งจนเกินไปก็ให้ทำการขยายขนาดของระดับการควอนไทซ์ และถ้าสังเกตเห็นว่าสัญญาณอินพุทตกอยู่ภายในระดับเดียวกันหลายครั้งจนเกินไปก็ให้ลดขนาดของระดับการควอนไทซ์ลง Nuggehally S. Jayant ได้แสดงให้เห็นว่าในการย่อหรือขยายระดับการควอนไทซ์นั้นไม่จำเป็นต้องสังเกตจากเอาท์พุทจากควอนไทซ์เซอร์จำนวนมากก็ได้ แต่สามารถทำได้โดยสังเกตจากเพียงเอาท์พุทเดียวและ Jayant ได้ตั้งชื่อการควอนไทซ์แบบนี้ว่า Quantization with one word memory แต่มักเป็นที่รู้จักว่า Jayant Quantizer หลักการของ Jayant Quantizer คือถ้าอินพุทตกอยู่นอกระดับก็ให้ทำการขยายขนาดของระดับการควอนไทซ์ และถ้าสัญญาณอินพุทตกอยู่ภายในระดับก็ทำการย่อขนาดของระดับการควอนไทซ์ลง

การย่อยขยายขนาดของระดับการควอนไทซ์จะทำโดยการกำหนดตัวคูณ M_k ของแต่ละระดับถ้าสัญญาณอินพุทลำดับที่ n -1 ตกอยู่ในระดับที่ k ขนาดของระดับการควอนไทซ์ที่จะใช้กับอินพุทลำดับที่ n จะได้มาจากผลคูณของ M_k กับขนาดของระดับการควอนไทซ์ของอินพุทลำดับที่ n -1 ตัวคูณที่สัญญาณตกในระดับการควอนไทซ์จะมีค่าน้อยกว่า 1 และค่าของตัวคูณที่สัญญาณตกนอกระดับการควอนไทซ์จะมีค่ามากกว่า 1 สำหรับการปรับเปลี่ยนขนาดของระดับการควอนไทซ์สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

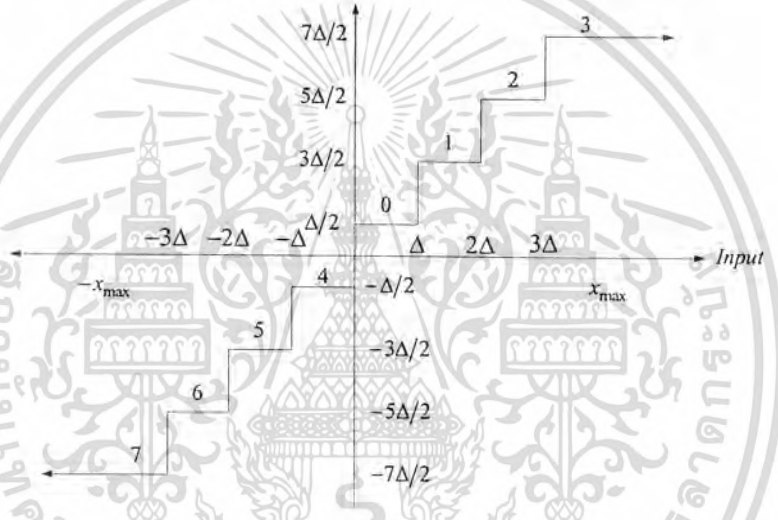
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta_n = M_{l(n-1)}\Delta_{n-1} \tag{2.9}$$

$l_{(n-1)}$ คือระดับการควอนไทซ์ที่เวลา n - 1

ตัวอย่างสำหรับกระบวนการปรับเปลี่ยนขนาดของระดับการควอนไทซ์

สมมติเราออกแบบควอนไทซ์เซอร์ 3 บิท จะมีระดับอยู่ 8 ระดับ และแต่ละระดับมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจะได้ตัวคูณเป็น $M_0 = M_4 \quad M_1 = M_5 \quad M_2 = M_6 \quad M_3 = M_7$ ดังรูปที่ 2.7 และสมมติให้ตัวคูณแต่ละระดับเป็น $M_0 = M_4 = 0.8 \quad M_1 = M_5 = 0.9 \quad M_2 = M_6 = 1 \quad M_3 = M_7 = 1.2$ ให้ขนาดของระดับการควอนไทซ์เริ่มต้นเป็น $\Delta_0 = 0.5$ และให้สัญญาณอินพุทเป็น {0.1 0.2 0.2 0.1 0.3 0.1 0.2 0.5 0.9 1.5 ...}



รูปที่ 2.7 Jayant Quantizer

เมื่ออินพุทตัวแรกถูกป้อนให้กับควอนไทซ์เซอร์จะตกอยู่ในระดับที่ 0 และเอาท์พุทจะเท่ากับ 0.25 ทำให้เกิดค่าความผิดพลาด 0.15 และขนาดของระดับการควอนไทซ์ใหม่จะเป็น Δ_1 คือ $M_0 \times \Delta_0 = 0.8 \times 0.5 = 0.4$ อินพุทตัวที่สอง -0.2 จะตกอยู่ในระดับที่ 4 จะให้เอาท์พุทเป็น -0.2 และขนาดของระดับการควอนไทซ์ครั้งต่อไปจะเป็น $\Delta_2 = M_4 \times \Delta_1$ เมื่อทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อย ๆ จะได้ค่าของขนาดระดับการควอนไทซ์และเอาท์พุทดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 กระบวนการของ Jayant Quantizer

ลำดับสัญญาณ	ขนาดของระดับการควอนไทซ์	อินพุท	ระดับของควอนไทซ์เซอร์	เอาท์พุท	ความผิดพลาดการควอนไทซ์	การปรับขนาดของระดับการควอนไทซ์
0	0.5	0.1	0	0.25	0.15	$\Delta_1 = M_0 \times \Delta_0$
1	0.4	-0.2	4	-0.2	0	$\Delta_2 = M_4 \times \Delta_1$
2	0.32	0.2	0	0.16	0.04	$\Delta_3 = M_0 \times \Delta_2$
3	0.256	0.1	0	0.128	0.028	$\Delta_4 = M_0 \times \Delta_3$
4	0.2048	-0.3	5	-0.3072	-0.0072	$\Delta_5 = M_5 \times \Delta_4$
5	0.1843	0.1	0	0.0922	0.0078	$\Delta_6 = M_0 \times \Delta_5$
6	0.1475	0.2	1	0.2212	0.0212	$\Delta_7 = M_1 \times \Delta_6$
7	0.1328	0.5	3	0.4646	-0.0354	$\Delta_8 = M_3 \times \Delta_7$
8	0.1594	0.9	3	0.5578	-0.3422	$\Delta_9 = M_3 \times \Delta_8$
9	0.1913	1.5	3	0.6696	-0.8304	$\Delta_{10} = M_3 \times \Delta_9$
10	0.2296	1	3	0.8036	0.1964	$\Delta_{11} = M_3 \times \Delta_{10}$
11	0.2755	1.9	3	0.9643	0.0643	$\Delta_{12} = M_3 \times \Delta_{11}$

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าถ้าสัญญาณอินพุทที่มีขนาดเล็กเข้ามาอย่างต่อเนื่องจะทำให้ขนาดของระดับการควอนไทซ์มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลงและเมื่ออินพุทตัวสุดท้ายซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของระดับการควอนไทซ์ถูกป้อนเข้าไป ระดับการควอนไทซ์เดิมซึ่งมีขนาดเล็กอยู่แล้วจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดมากเช่นเดียวกับช่วงสถานะเริ่มต้น นั่นหมายความว่าถ้าอินพุทมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่อินพุทมีความถี่สูงก็ย่อมจะให้ค่าความผิดพลาดมากตามไปด้วย และยิ่งกว่านั้นถ้าสัญญาณอินพุทที่มีขนาดเล็กเข้ามาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานแล้วขนาดของระดับการควอนไทซ์อาจมีขนาดเล็กจนเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดขนาดของระดับการควอนไทซ์ที่เล็กที่สุด (Δ_{min}) เพื่อป้องกันไม่ให้เหตุการณ์การนั้นเกิดขึ้น และเช่นเดียวกันกับกรณีที่สัญญาณอินพุทที่มีขนาดใหญ่เข้ามาอย่างต่อเนื่องขนาดของระดับการควอนไทซ์ก็จะค่ามากขึ้นจนอาจเข้าสู่ค่าอนันต์ดังนั้นเราจะต้องกำหนดขนาดของระดับการควอนไทซ์ที่มากที่สุด (Δ_{max}) ไว้ด้วย จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นว่าการปรับเปลี่ยนขนาดของระดับการควอนไทซ์นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวคูณที่กำหนดขึ้นและถ้ากำหนดตัวคูณไม่เหมาะสมจนทำให้การตอบสนองของการปรับตัวเป็นไปอย่างรวดเร็วเกินไปอาจส่งผลให้ควอนไทซ์เซอร์ขาดเสถียรภาพได้ ขั้นตอนการเลือกค่าตัวคูณมีดังนี้ ขั้นตอนแรกถ้าอินพุทมีความน่าจะเป็นในการตกภายในระดับการควอนไทซ์ที่ k เป็น P_k (ประมาณจากระดับการควอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทซ์คงที่) และข้อกำหนดสำหรับความสัมพันธ์กันระหว่างอินพุทกับควอนไทซ์เซอร์ซึ่ง Jayant ระบุไว้ว่าผลคูณของการย่อและขยายทั้งหมดต้องเท่ากับ 1 [5] นั่นคือถ้า n_k คือจำนวนครั้งในการตกของอินพุทในระดับที่ k จะได้

$$\prod_{k=1}^{2^{R_{bit}}-1} M_k^{n_k} = 1 \tag{2.10}$$

ซึ่งก็คือสามารถแทน n_k ด้วยค่าความน่าจะเป็น P_k ได้เป็น

$$\prod_{k=1}^{2^{R_{bit}}-1} M_k^{P_k} = 1 \tag{2.11}$$

จะเห็นว่ามีจำนวนตัวคูณมากมายที่ทำให้สมการ (2.11) เป็นจริง เพื่อจำกัดจำนวนตัวคูณที่เป็นไปได้ กำหนดให้

$$M_k = \gamma^{l_k} \tag{2.12}$$

โดย $\gamma > 1$ และ $\pm l_k = \{0 \;\; 1 \;\; 2 \;\; 3 \cdots\}$ [5]

จากสมการ (2.11) และ (2.12) จะได้

$$\prod_{k=1}^{2^{R_{bit}}-1} \gamma_k^{l_k P_k} = 1 \tag{2.13}$$

นั่นคือ

$$\sum_{k=1}^{2^{R_{bit}}-1} l_k P_k = 0 \tag{2.14}$$

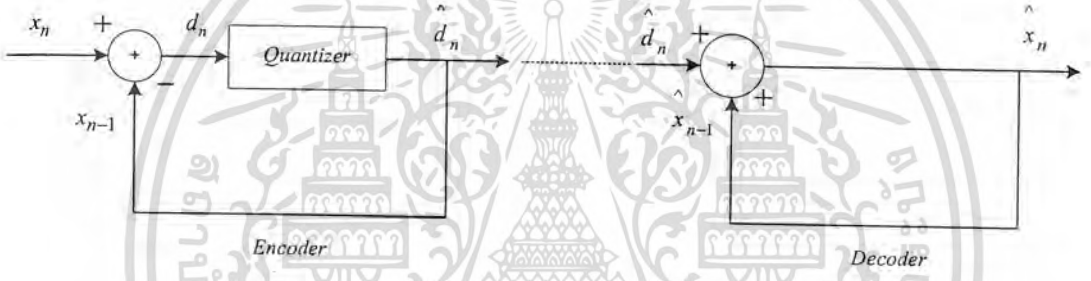
ขั้นตอนที่สอง เมื่อทราบค่า P_k แล้วให้ทำการหาค่าเซท l_k ที่ทำให้สมการ (2.14) เป็นจริงขั้นตอนสุดท้ายคือกำหนดค่า γ ถ้ากำหนดให้ค่ามากจะส่งผลให้การปรับขนาดเป็นไปอย่างรวดเร็วแต่หากกำหนดมากจนเกินไปจะทำให้ขาดเสถียรภาพ ถ้ากำหนดน้อยจะทำให้การปรับขนาดเป็นไปอย่างช้าๆแต่จะมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การมอดูเลตรหัสพัลส์แบบใช้ค่าความแตกต่างสัญญาณ (Differential Pulse Code Modulation)

เมื่อสัญญาณเสียงถูกสุ่มออกมาด้วยความถี่ไนควิสต์จะเห็นว่าแต่ละลำดับสัญญาณจะมีแอมปลิจูดไม่ต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับตัวข้างเคียง ดังนั้นจึงสามารถที่จะทำนาย (Predict) การเกิดของสัญญาณตัวถัดไปได้โดยขึ้นอยู่กับค่าแอมปลิจูดของสัญญาณตัวก่อนหน้า (Previous Sample) แล้วนำค่าที่ทำนายได้มาหักลบกับสัญญาณอินพุทตัวถัดไป เมื่อทำกระบวนการนี้ไปเรื่อย ๆ (สัญญาณต่อสัญญาณ) จะทำให้ผลต่างสัญญาณ (Residual sequence) ที่ได้ก็ยังคงมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณอินพุทเดิมแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดหรือไดนามิคเรนจ์ (Dynamic Range) ลดลง และเราจะใช้ผลต่างสัญญาณนี้เป็นตัวแทนในการส่งออกไปยังด้านรับ นั้นหมายความว่าสามารถใช้จำนวนบิต (Bit) ในการเข้ารหัสน้อยลง (ข้อมูลถูกบีบอัด) และจะส่งผลให้อัตราการส่งข้อมูล (Bit Rate) ลดลงด้วย

2.5.1 กระบวนการพื้นฐานของ ดีพีซีเอ็ม



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมแนวคิดพื้นฐานของดีพีซีเอ็ม

จากรูปที่ 2.8 พิจารณาลำดับสัญญาณที่ถูกสุ่ม $\{x_n\}$ และผลต่างสัญญาณ $\{d_n\}$ ที่ได้จาก $x_n - x_{n-1}$ ผลต่าง d_n นี้จะถูกจัดระดับด้วยควอนไทเซอร์ (Quantizes) ได้ลำดับสัญญาณเอาท์พุท $\left\{\hat{d}_n\right\}$

$$\hat{d}_n = Q[d_n] = d_n + q_n \tag{2.15}$$

q_n คือค่าความผิดพลาดในการควอนไทซ์ (Quantization Noise) ค่า $\hat{d}_n$ นี้จะเป็นตัวแทนสัญญาณต้นฉบับ (ถูกบีบอัดแล้วเมื่อเทียบกับ x_n) ส่งไปยังภาครับ ในการสร้างสัญญาณต้นฉบับ $\{\hat{x}_n\}$ กลับมา (Reconstructed) สามารถทำได้โดยการบวกค่า $\{\hat{d}_n\} = \{6.23\ \ 3.5\ \ -7.3\ \ 2.1\ \ -0.6\ \ -3.2\ \ -2.4\}$ เข้ากับสัญญาณ $\hat{x}_{n-1}$ ซึ่งเป็นสัญญาณตัวที่ถูกสร้างขึ้นก่อนหน้านั้น

$$\hat{x}_n = \hat{x}_{n-1} + \hat{d}_n \tag{2.16}$$

พิจารณาแนวคิดข้างต้นโดยสมมติให้ทั้งทางด้านเข้ารหัส (Encoder) และถอดรหัส (Decoder) เริ่มต้นที่สัญญาณ x_0 นั่นคือ $\hat{x}_0 = x_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_1 = x_1 - x_0$$

$$\hat{d}_1 = Q[d_1] = d_1 + q_1$$

$$\hat{x}_1 = x_0 + \hat{d}_1 = x_0 + d_1 + q_1 = x_1 + q_1$$

$$d_2 = x_2 - x_1$$

$$\hat{d}_2 = Q[d_2] = d_2 + q_2$$

$$\hat{x}_2 = \hat{x}_1 + \hat{d}_2 = x_1 + q_2 + x_2 + q_2$$

$$= x_1 + q_1 + x_2 + q_2$$

$$= x_2 + q_1 + q_2$$

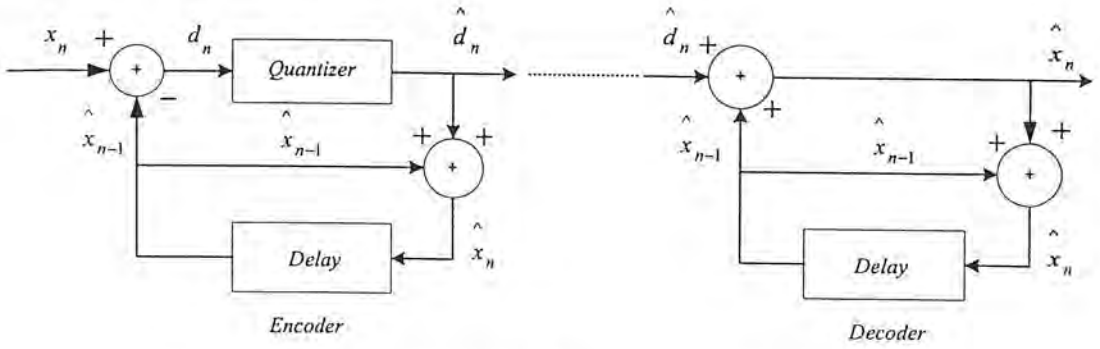
และเมื่อทำการพิจารณาถึงลำดับที่ n สัญญาณ (n^{th} Sample) จะได้

$$\hat{x}_n = x_n + \sum_{k=1}^{n} q_k \qquad (2.17)$$

สามการ (2.17) หมายความว่า การนำเอาสัญญาณตัวก่อนหน้านั้นหักลบกับสัญญาณตัวถัดไปโดยตรงจะส่งผลให้เกิดการสะสมของค่าความผิดพลาดในการควอนไทซ์ขึ้น สมมติลำดับสัญญาณอินพุทเป็น $\{x_n\} = \{6.2\ 9.7\ 13.2\ 5.9\ 8\ 7.4\ 4.2\ 1.8\}$ และดำเนินการตามสมการ $d_n = x_n - x_{n-1}$ จะได้ $\{d_n\} = \{6.23\ 3.5\ -7.3\ 2.1\ -0.6\ -3.2\ -2.4\}$ และสัญญาณ $\{d_n\}$ จะถูกป้อนเข้าควอนไทซ์เซอร์เพื่อจัดระดับได้เป็นสัญญาณ $\{\hat{d}_n\} = \{6\ 4\ 4\ -6\ 2\ 0\ -4\ -2\}$ การจัดระดับจะเกิดความผิดพลาดขึ้น $\{q_n\} = \{0.2\ -0.5\ -0.5\ -1.3\ 0.1\ -0.6\ 0.8\ -0.4\}$ เมื่อส่งลำดับสัญญาณ $\{\hat{d}_n\}$ ออกไปทางด้านรับจะทำการสร้างสัญญาณ $\{\hat{x}_n\}$ กลับขึ้นมาด้วยสมการ $\hat{x}_n = \hat{x}_{n-1} + \hat{d}_n$ จะได้ $\{\hat{x}_n\} = \{6\ 10\ 14\ 18\ 10\ 6\ 4\}$ เมื่อเปรียบเทียบ $\{x_n\}$ กับ $\{\hat{x}_n\}$ ด้วยสมการ (2.17) จะเห็นว่าเกิดการสะสมของค่าความผิดพลาดในการควอนไทซ์ขึ้นจริง ข้อเท็จจริงดังกล่าวเป็นข้อเสียของวิธีการบีบอัดข้อมูลด้วยการเอาสัญญาณตัวก่อนหน้ามาหักลบกับสัญญาณตัวปัจจุบันโดยตรง จึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ในบีบอัดข้อมูลเสียงได้

จากปัญหาข้างต้นจึงได้เกิดแนวคิดใหม่จากการสังเกตว่าด้านเอาท์พุทของตัวถอดรหัสนั้นเป็น $\{\hat{x}_n\}$ ดังนั้น ทางด้านส่งก็ควรจะนำค่า $\{\hat{x}_n\}$ มาเป็นตัวหักลบกับ x_n ตัวถัดไป ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่ายของดีพีซีเอ็ม

จะได้ $$d_n = x_n - \hat{x}_{n-1}$$

พิจารณาตามแนวคิดใหม่ โดยสมมติว่าตัวเข้ารหัสและถอดรหัสเริ่มต้นที่สัญญาณ x_0 นั่นคือ

$$\hat{x}_0 = x_0$$

$$d_1 = x_1 + x_0$$

$$\hat{d}_1 = Q[d_1] = d_1 + q_1$$

$$\hat{x}_1 = x_0 + \hat{d}_1 = x_0 + d_1 + q_1$$

$$= x_0 + x_1 - x_0 + q_1$$

$$= x_1 + q_1$$

$$d_2 = x_2 + \hat{x}_1$$

$$\hat{d}_2 = Q[d_2] = d_2 + q_2$$

$$\hat{x}_2 = \hat{x}_1 + \hat{d}_2$$

$$= x_2 + q_2$$

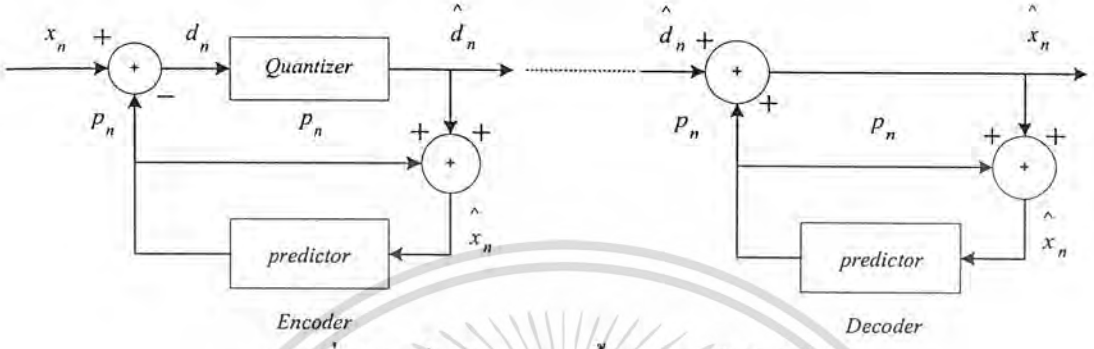
และเมื่อทำการพิจารณาถึงลำดับที่ n สัญญาณจะได้

$$\hat{x}_n = x_n + q_n \tag{2.18}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.17) กับ (2.18) จะเห็นว่าไม่เกิดการสะสมของค่าความผิดพลาดจากการควอนไทซ์ นั่นหมายความว่าสัญญาณรบกวนจากการทำควอนไทซ์จะเกิดขึ้นจากค่าความผิดพลาดในการควอนไทซ์ ณ ลำดับที่ n เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจุดประสงค์ ดีพีซีเอ็ม คือลดแอมปลิจูดของสัญญาณนั่นหมายความว่า $\hat{x}_{n-1}$ จะต้องมีค่าเข้าใกล้ x_n มากๆ เท่าที่จะเป็นไปได้ จึงเกิดแนวคิดใหม่ขึ้นอีกว่า ถ้าเราเก็บลำดับสัญญาณไว้จำนวนหนึ่งแล้วนำมาคำนวณค่าทำนายสัญญาณตัวถัดไปผ่านทางฟังก์ชั่นการทำนาย (Prediction Function) เราก็จะได้สัญญาณที่จะนำไปหักลบกับสัญญาณตัวถัดไปได้เข้าใกล้สัญญาณตัวนั้นมากขึ้น



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของดีพีซีเอ็ม

2.5.2 ฟังก์ชั่นการทำนาย (Prediction Function)

การลดแอมปลิจูดหรือความแปรปรวนของสัญญาณต้นฉบับจะได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าในการทำนายว่าจะทำนายได้เข้าใกล้สัญญาณตัวถัดไปได้มากน้อยเพียงใด ในกระบวนการทำนายเราจะเก็บข้อมูลจำนวนหนึ่งไว้ประมาณค่าสัญญาณตัวถัดไป โดยประมาณจากกระบวนการอัตสหประสาน (Autocorrelation) อัลกอริทึมนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการทำนายแบบปรับตัวได้ด้วย [5]

กำหนดให้ σ_d^2 เป็นค่าความแปรปรวน (Variance) ของผลต่างสัญญาณ d_n

$$\sigma_d^2 = E[(x_n - p_n)^2] \tag{2.19}$$

$$p_n = \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i} \tag{2.20}$$

$$\sigma_d^2 = E[(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i})] \tag{2.21}$$

N คืออันดับของตัวทำนาย (Order of Predictor)

การจะทำให้แอมปลิจูดหรือความแปรปรวนน้อยที่สุด (Minimize Mean Square Error,MSE) จะต้องหาอนุพันธ์ของ σ_d^2 เทียบกับสัมประสิทธิ์ของตัวทำนาย $\{a_i\}$ และให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{\delta\sigma_d^2}{\delta a_1} = -2E[(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i x_{n-i})x_{n-1}] = 0$$

$$\frac{\delta\sigma_d^2}{\delta a_2} = -2E[(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i x_{n-i})x_{n-2}] = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\delta\sigma_d^2}{\delta a_3} = -2E[(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i x_{n-i})x_{n-3}] = 0$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$\frac{\delta\sigma_d^2}{\delta a_N} = -2E[(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i x_{n-i})x_{n-N}] = 0 \tag{2.22}$$

ทำ Expectation สมการ (2.22) จะได้

$$\sum_{i=1}^{N} a_i R_{xx}(i-1) = R_{xx}(1)$$

$$\sum_{i=1}^{N} a_i R_{xx}(i-2) = R_{xx}(2)$$

$$\sum_{i=1}^{N} a_i R_{xx}(i-3) = R_{xx}(3)$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$\sum_{i=1}^{N} a_i R_{xx}(i-N) = R_{xx}(N) \tag{2.23}$$

$R_{xx}(k)$ คือ อัตสหประสาน (Autocorrelation) ที่ k

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{M-k}\sum_{i=1}^{M-k} x_i x_{i-k} \tag{2.24}$$

จากสมการ (2.23) สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของเมทริก

$$RA = P \tag{2.25}$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(1) & R_{xx}(2)\cdots\cdots R_{xx}(N-1) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & R_{xx}(1)\ \cdots\cdots R_{xx}(N-2) \\ R_{xx}(2) & R_{xx}(1) & R_{xx}(0)\cdots\cdots\ R_{xx}(N-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots \\ R_{xx}(N-1) & R_{xx}(N-2) & R_{xx}(N-3)\cdots\cdots R_{xx}(0) \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

$$A = [a_1\ a_2\ a_3 \cdots a_N]^T \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P=[R_{xx}(1)\ \ R_{xx}(2)\ \ R_{xx}(3)\cdots R_{xx}(N)]^T \tag{2.28}$$

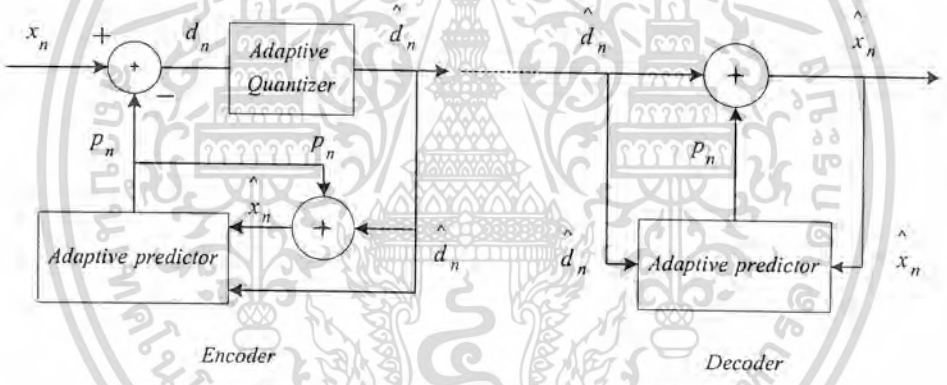
จากสมการ (2.24) เมื่อทราบค่าออโตคอรีเลชั่น ที่ k แล้ว เราสามารถที่จะหาเซทของสัมประสิทธิ์ตัวทำนาย (Predictor Coefficients) ได้ดังนี้

$$A=R^{-1}P \tag{2.29}$$

2.5.3 ฟังก์ชั่นการทำนายแบบปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ (Adaptive Prediction Function)

การบีบอัดข้อมูลเสียงด้วยการทำนายการเกิดของตัวอย่างสัญญาณถัดไป จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นถ้าสามารถปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ตัวทำนายให้สัมพันธ์กับสัญญาณอินพุทตัวก่อนหน้า กระบวนการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์สามารถทำได้สองแบบคือ การปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แบบป้อนไปข้างหน้า(Forward Adaptive)[3] และการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แบบป้อนกลับ(Backward Adaptive) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แบบป้อนกลับ

การปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แบบป้อนกลับ (Backward Adaptive)



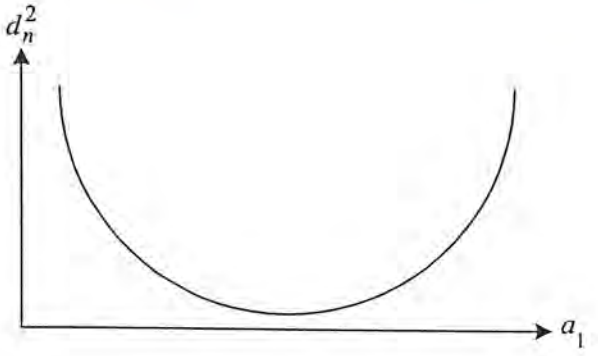
รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานของเอดีพีซีเอ็ม

เพื่อแก้ปัญหาของการปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แบบป้อนไปข้างหน้า เราสามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์โดยขึ้นอยู่กับค่าเอาท์พุทของตัวเข้ารหัส การหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวทำนายนั้นใช้เงื่อนไขคือทำให้ค่าผิดพลาดจากการทำนายหรือไดนามิกเรนจ์ยกกำลังสองที่มีค่าน้อยที่สุด เพื่อง่ายต่อการพิจารณาจึงเริ่มพิจารณาด้วยฟังก์ชั่นการทำนายอันดับหนึ่ง (First Order Predictor) ค่าความผิดพลาดจากการทำนายที่เวลา n ถูกกำหนดโดย

$$d_n^2=(x_n-a_1\hat{x}_{n-1})^2 \tag{2.30}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า d_n^2 กับ a_1 จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ผลต่างสัญญาณกำลังสองเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวทำนายอันดับ 1

จากรูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์ a_1 ที่เหมาะสมที่สุด (Optimal) ที่ทำให้ d_n^2 มีค่าน้อยที่สุดคือค่าการทำอนุพันธ์ d_n^2 เทียบค่า a_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อค่า a_1 เริ่มมีค่าเบี่ยงเบนไปทางซ้ายจากกค่าที่เหมาะสมที่สุด จะได้ค่าอนุพันธ์ ณ จุดนั้นเป็นลบ และค่าอนุพันธ์จะยิ่งติดลบมากขึ้นเมื่อ a_1 นั้นขยับออกห่างจากค่าที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเราต้องการปรับค่า a_1 ให้เข้ามาใกล้จุดที่เหมาะสมที่สุด ต้องนำค่าอนุพันธ์ที่ได้มาบวก a_1 เดิมเพื่อให้ค่า a_1 กลับมาอยู่ที่ค่าที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อ a_1 ขยับออกห่างจุดที่เหมาะสมที่สุดไปทางขวา จะทำให้ค่าอนุพันธ์ ณ จุดนั้นเป็นบวก เมื่อต้องการปรับค่า a_1 ให้กลับมาอยู่ที่ที่เหมาะสมที่สุดต้องนำค่าอนุพันธ์ที่ได้มาลบออกจาก a_1 เดิม จากแนวคิดข้างต้น เราสามารถเขียนสมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a_1 ที่เวลา $n+1$ ได้ดังนี้

$$a_1^{(n+1)} = a_1^{(n)} - \alpha \frac{\delta d_n^2}{\delta a_1} \tag{2.31}$$

ทำการหาอนุพันธ์สมการ (2.30) เทียบกับสัมประสิทธิ์ a_1 จะได้

$$\frac{\delta d_n^2}{\delta a_1} = 2(x_n - a_1 \hat{x}_{n-1})(-x_{n-1})$$

$$= -2(x_n - a_1 \hat{x}_{n-1})(x_{n-1}) \tag{2.32}$$

จากสมการ (2.30) จะได้

$$d_n = x_n - a_1 \hat{x}_{n-1} \tag{2.33}$$

ทำการแทนสมการ (2.33) ลงในสมการ (2.32) จะได้

$$\frac{\delta d_n^2}{\delta a_1} = -2 d_n \hat{x}_{n-1} \tag{2.34}$$

แทนสมการ (2.34) ลงในสมการ (2.31) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61785

$$a_1^{(n+1)} = a_1^{(n)} - \alpha d_n \hat{x}_{n-1} \tag{2.35}$$

โดย 2 จะถูกรวมอยู่ในค่าคงที่ α

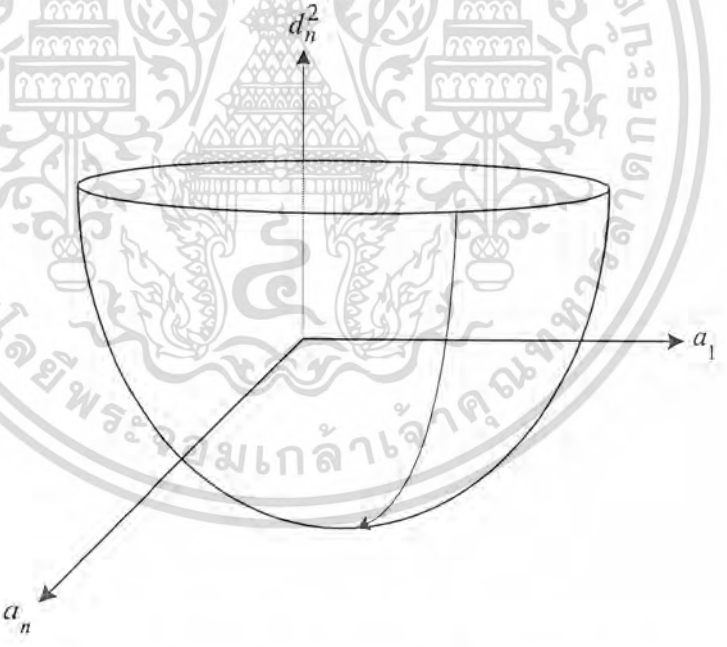
สำหรับ d_n ในสมการ (2.35) นั้น เป็นค่าที่ใช้เฉพาะในส่วนของตัวเข้ารหัสและเพื่อให้ด้านเข้ารหัสและถอดรหัสใช้กระบวนการ (Algorithm) เดียวกัน จึงแทน d_n ด้วย $\hat{d}_n$ ลงในสมการ (2.35) จะได้

$$a_1^{(n+1)} = a_1^{(n)} - \alpha \hat{d}_n \hat{x}_{n-1} \tag{2.36}$$

สมการที่ (2.36) เป็นเพียงการปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของตัวทำนายอันดับหนึ่งเท่านั้น เมื่อเราต้องการเพิ่มอันดับตัวทำนายเป็นอันดับ N เราก็เริ่มกระบวนการวิเคราะห์เช่นเดียวกับสมการที่ (2.30) ถึง (2.36) แต่ค่า d_n^2 ในสมการ (2.30) จะเปลี่ยนเป็น

$$d_n^2 = (x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i})^2 \tag{2.37}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า d_n^2 กับ a_1 ถึง a_N จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลต่างสัญญาณกำลังสองเทียบกับสัมประสิทธิ์ตัวทำนายอันดับ N

เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อันดับ N ได้ดังนี้

$$a_N^{(n+1)} = a_N^{(n)} - \alpha \frac{\delta d_n^2}{\delta a_n} \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาค่าอนุพันธ์สมการที่ (2.37) เทียบกับ $a_1, a_2, a_3, \cdots a_N$ ตามลำดับ

$$\frac{\delta d_n^2}{\delta a_1} = 2(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i})(-\hat{x}_{n-1}) = -2\hat{d}_n \hat{x}_{n-1}$$

$$\frac{\delta d_n^2}{\delta a_2} = 2(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i})(-\hat{x}_{n-2}) = -2\hat{d}_n \hat{x}_{n-2}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{\delta d_n^2}{\delta a_N} = 2(x_n - \sum_{i=1}^{N} a_i \hat{x}_{n-i})(-\hat{x}_{n-N}) = -2\hat{d}_n \hat{x}_{n-N} \qquad (2.39)$$

นำสมการ (2.39) แทนลงในสมการ (2.38) โดยจัดรูปให้อยู่ในเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}^{(n)} + \alpha \hat{d}_n \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{x}_{n-2} \\ \hat{x}_{n-3} \\ \vdots \\ \hat{x}_{n-N} \end{bmatrix} \qquad (2.40)$$

ค่าคงที่ α นั้นเป็นค่าที่ใช้ควบคุมอัตราการลู่เข้า (Convergence Rate) ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

$$0 < \alpha < \frac{1}{10NP_x} \qquad (2.41)$$

P_x เป็นค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณอินพุทที่ประมาณไว้ดังนี้

$$P_x = \frac{1}{1+M} \sum_{i=1}^{M} x^2(n) = \frac{R_{xx}(o)}{1+M} \qquad (2.42)$$

การกำหนดค่าอัตราการลู่เข้า α ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขสมการที่ (2.41) เพราะเนื่องจากถ้ากำหนดค่ามาก ผลที่ได้จะทำให้อัตราการลู่เข้าสู่ค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเร็วกว่าค่า α น้อย เมื่อเทียบกับจำนวนรอบในการประมวลผล (จำนวนสัญญาณอินพุท) แต่ถ้ากำหนด α มากจนเกินไปจะทำให้ขาดเสถียรภาพ กระบวนการทำนายแบบนี้เรียกว่า ลีสมีนสแควร์ (Least Mean Squared : LMS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การคำนวณและการสร้าง

3.1 การออกแบบฟังก์ชั่นการทำงานของดีพีซีเอ็ม และเอดีพีซีเอ็ม

3.1.1 ฟังก์ชั่นการทำนายดีพีซีเอ็ม

จากสมการออโตคอรีเลชั่น $R_{xx}(k)=\frac{1}{M-k}\sum_{i=1}^{M-k}x_i x_{i-k}$

จะหาค่าที่ทำนายได้โดยสมการ $P=[R_{xx}(1)\ \ R_{xx}(2)\ \ R_{xx}(3)\cdots R_{xx}(N)]^T$

และจากสมการ $R=\begin{bmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(1) & R_{xx}(2)\cdots\cdots R_{xx}(N-1) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & R_{xx}(1)\ \cdots\cdots\ R_{xx}(N-2) \\ R_{xx}(2) & R_{xx}(1) & R_{xx}(0)\cdots\cdots\ R_{xx}(N-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{xx}(N-1) & R_{xx}(N-2) & R_{xx}(N-3)\cdots\cdots R_{xx}(0) \end{bmatrix}$

เมื่อทราบค่าออโตคอรีเลชั่น สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวทำนายได้จากสมการ

$$A=R^{-1}P$$

3.1.2 ฟังก์ชั่นการทำนายเอดีพีซีเอ็ม

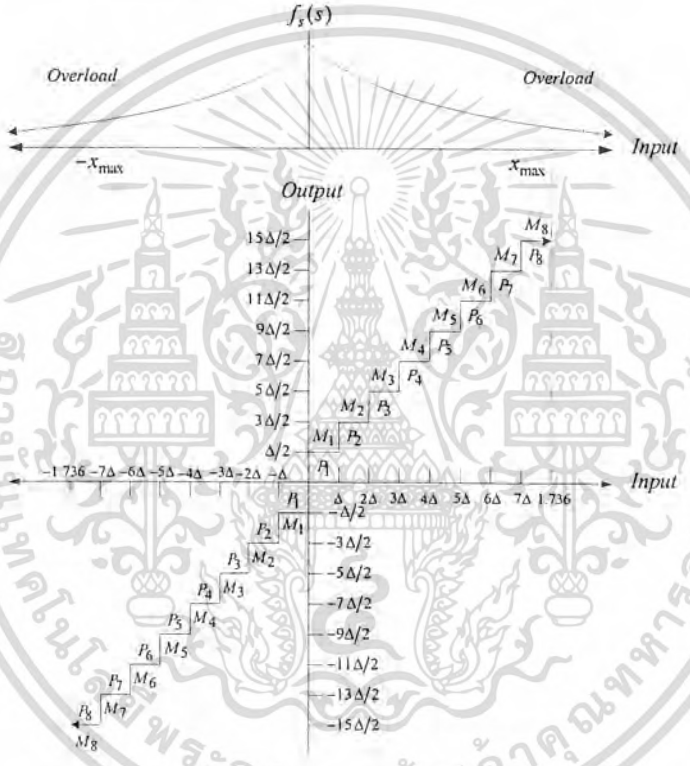
การปรับปลี่ยนสัมประสิทธิ์ตัวทำนายได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}^{(n+1)} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}^{(n)} + \alpha\hat{d}_n \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{x}_{n-2} \\ \hat{x}_{n-3} \\ \vdots \\ \hat{x}_{n-N} \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม และแบบปรับตัว

ทำการออกแบบตวอนไทซ์เซอร์ขนาด 4 บิตและสัญญาณอินพุทมีค่าในช่วง (-1.736,1.736) จากสมการ (2.3) เราจะได้ขนาดของระดับการควอนไทซ์แบบยูนิฟอร์มเป็น $\Delta = 0.217$ จากนั้นทำการออกแบบควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวโดยใช้หลักการของ Jayant Quantizer โดยตั้งสมมติฐานว่าสัญญาณอินพุทมีคุณสมบัติทางสถิติต่างไปจากเดิม สมมติให้สัญญาณอินพุทมีการกระจายแบบ Gaussian เมื่อป้อนเข้าสู่ควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์มและทำการหาค่าความน่าจะเป็นในการตกในแต่ละระดับได้เป็น P_1= 0.2638 P_2=0.2339 P_3=0.1866 P_4=0.133 P_5=0.0878 P_6=0.0496 P_7=0.0261 P_8=0.0193 ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองตามสมมติฐานได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองควอนไทซ์เซอร์ตามสมมติฐาน

จะเห็นว่ามีหลายทางเลือกของเซท $\{l_k\}$ ที่ทำให้สมการ (2.14) เป็นจริงเช่น

$$l_1 = \{-2\ \ -2\ \ -2\ \ -2\ \ 7\ \ 10\ \ 11\ \ 12\}$$

$$l_2 = \{-2\ \ -2\ \ -1\ \ 2\ \ 3\ \ 4\ \ 9\ \ 12\}$$

จากนั้นทำการกำหนดค่า γ ที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

$\gamma = 1.05$ จะได้เซทตัวคูณ $M'_{l1} = \{0.9\ \ 0.9\ \ 0.9\ \ 0.9\ \ 1.4\ \ 1.628\ \ 1.71\ \ 1.79\}$

$M'_{l2} = \{0.9\ \ 0.9\ \ 0.9\ \ 1.1\ \ 1.15\ \ 1.21\ \ 1.55\ \ 1.79\}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma = 1.07$ จะได้เซทตัวคูณ $M_{l1}^{"} = \{0.87\ \ 0.87\ \ 0.87\ \ 0.87\ \ 1.6\ \ 1.96\ \ 2.1\ \ 2.25\}$

$$M_{l2}^{"} = \{0.87\ \ 0.87\ \ 0.93\ \ 1.14\ \ 1.22\ \ 1.31\ \ 1.84\ \ 2.25\}$$

ทำการหาเซ็ตตัวคูณสำหรับควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวขนาด 2 บิต และ 3 บิตที่ใช้ในการทดลอง ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เซทตัวคูณสำหรับควอนไทซ์เซอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวคูณ	2 บิต	3 บิต	4 บิต
M1	0.8	0.93	0.87
M2	1.6	0.93	0.87
M3		1.71	0.93
M4		1.96	1.14
M5			1.22
M6			1.31
M7			1.84
M8			2.25

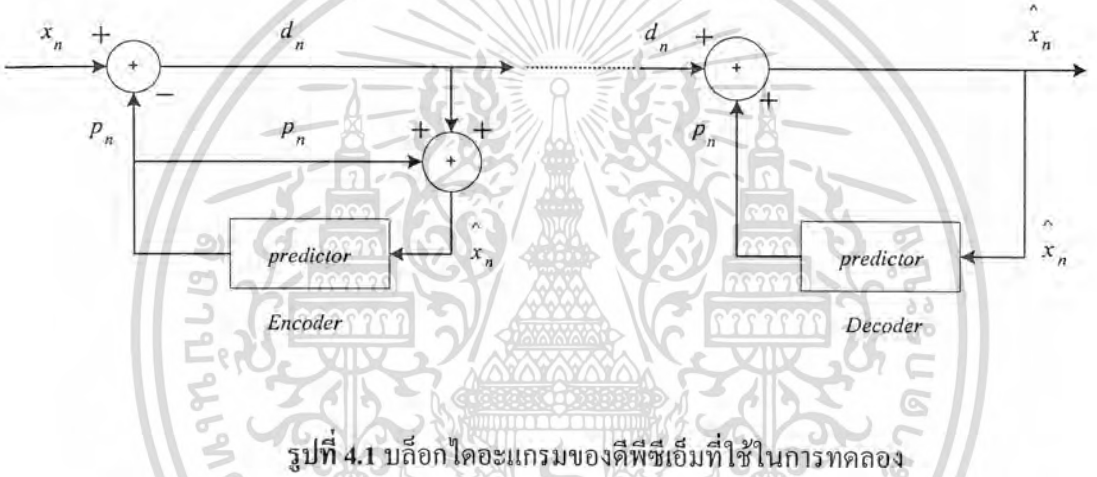
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

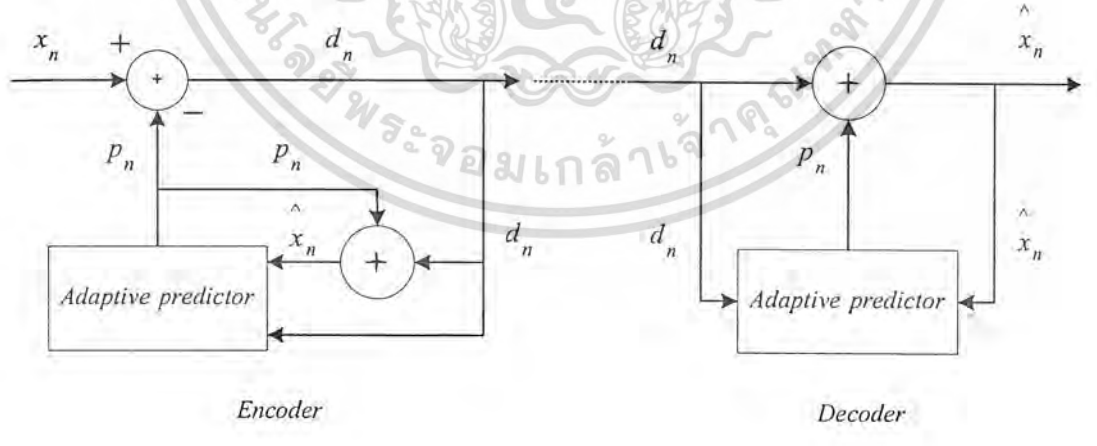
การทดลองและผลการทดลอง

4.1 จำลองการทำงานของฟังก์ชั่นการทำนายด้วยโปรแกรม MATLAB

ในการศึกษาการทำงานของระบบทั้งหมดของ เอดีพีซีเอ็ม จะแยกพิจารณาทีละส่วน ในขั้นแรกจะเป็นส่วนของการศึกษาถึงคุณสมบัติของตัวทำนาย โดยตัดส่วนของการควอนไทซ์ออกเพื่อศึกษาดูว่าในส่วนของตัวทำนายนั้นจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากน้อยเพียงไร และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทำนายแบบใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวทำนายคงที่ (ดีพีซีเอ็ม) ซึ่งมีการทำงานตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 การจำลองการทำงานของฟังก์ชั่นการทำนายใช้ความถี่สัญญาณเบสแบนด์ที่ 1000 เฮิรตซ์ และใช้ความถี่ในการสุ่ม 8000 เฮิรตซ์



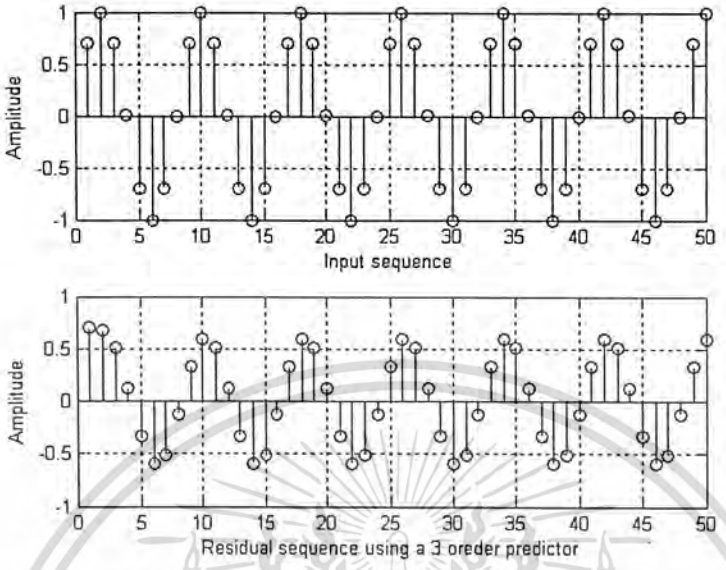
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของดีพีซีเอ็มที่ใช้ในการทดลอง



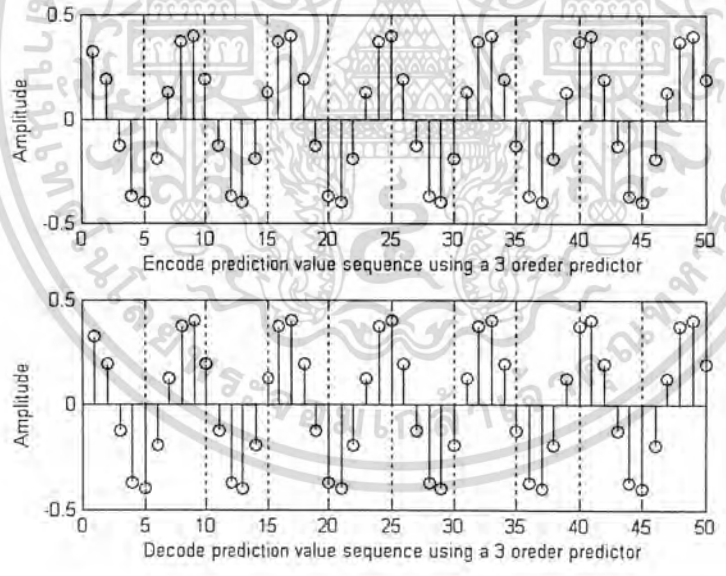
รูปที่4.2 บล็อกไดอะแกรมของเอดีพีซีเอ็มที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนายดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

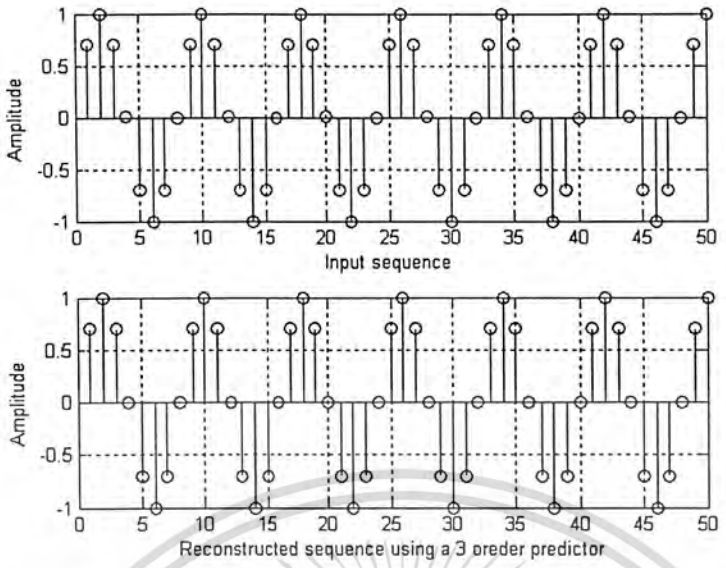


รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

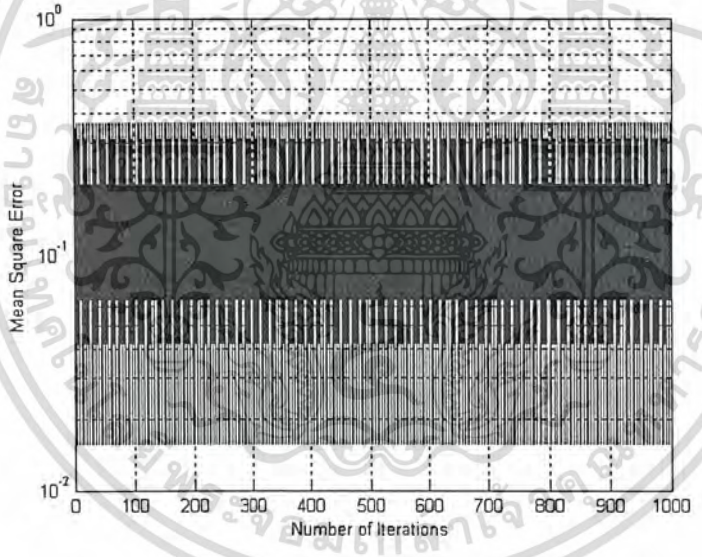


รูปที่ 4.4 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.6 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

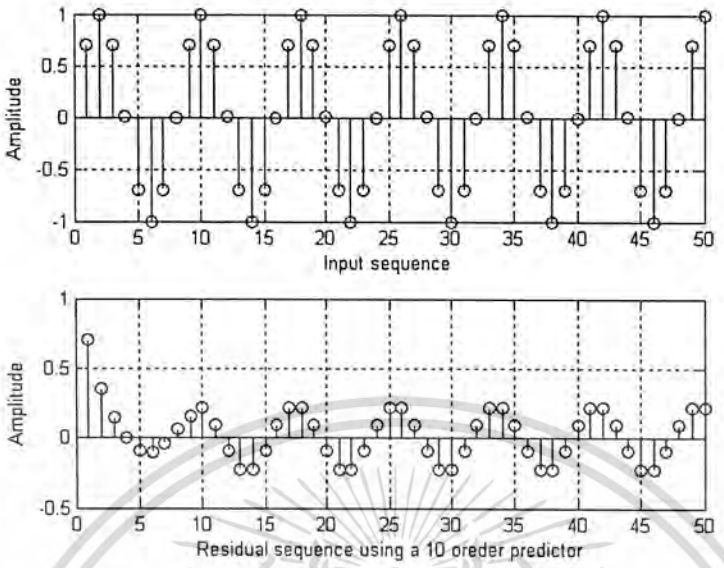
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

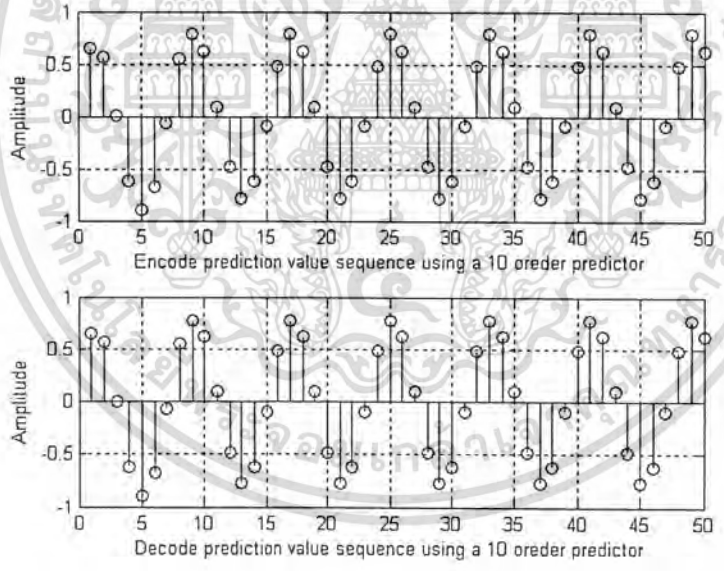
ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	0.194435	0.5999897	0.194435	1
27	0.7071068	-0.1250378	0.5126718	-0.1250378	0.7071068
28	0	-0.371265	0.1250378	-0.371265	0
29	-0.7071068	-0.4000103	-0.3358417	-0.4000103	-0.7071068
30	-1	-0.194435	-0.5999897	-0.194435	-1
31	-0.7071068	0.1250378	-0.5126718	0.1250378	-0.7071068
32	0	0.371265	-0.1250378	0.371265	0
33	0.7071068	0.4000103	0.3358417	0.4000103	0.7071068
34	1	0.194435	0.5999897	0.194435	1
35	0.7071068	-0.1250378	0.5126718	-0.1250378	0.7071068
36	0	-0.371265	0.1250378	-0.371265	0
37	-0.7071068	-0.4000103	-0.3358417	-0.4000103	-0.7071068
38	-1	-0.194435	-0.5999897	-0.194435	-1
39	-0.7071068	0.1250378	-0.5126718	0.1250378	-0.7071068
40	0	0.371265	-0.1250378	0.371265	0
41	0.7071068	0.4000103	0.3358417	0.4000103	0.7071068
42	1	0.194435	0.5999897	0.194435	1
43	0.7071068	-0.1250378	0.5126718	-0.1250378	0.7071068
44	0	-0.371265	0.1250378	-0.371265	0
45	-0.7071068	-0.4000103	-0.3358417	-0.4000103	-0.7071068
46	-1	-0.194435	-0.5999897	-0.194435	-1
47	-0.7071068	0.1250378	-0.5126718	0.1250378	-0.7071068
48	0	0.371265	-0.1250378	0.371265	0
49	0.7071068	0.4000103	0.3358417	0.4000103	0.7071068
50	1	0.194435	0.5999897	0.194435	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนายดีพีซีเอ็ม อันดับ 10

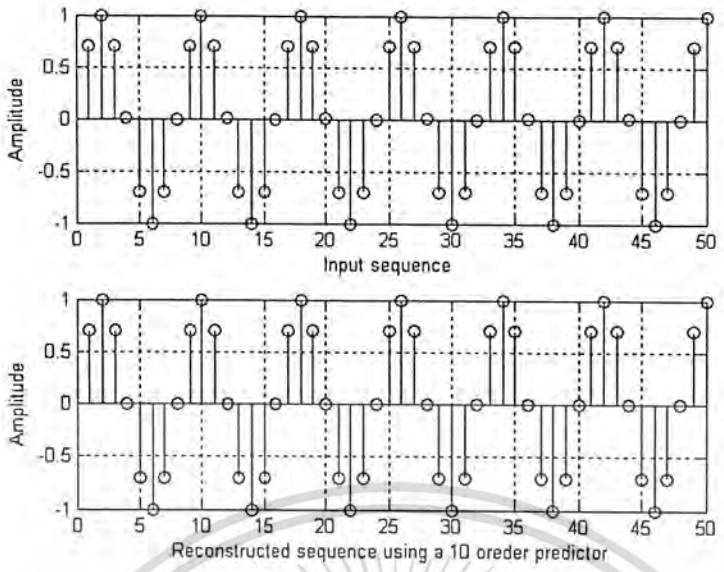


รูปที่ 4.7 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง ดีพีซีเอ็ม อันดับ 10

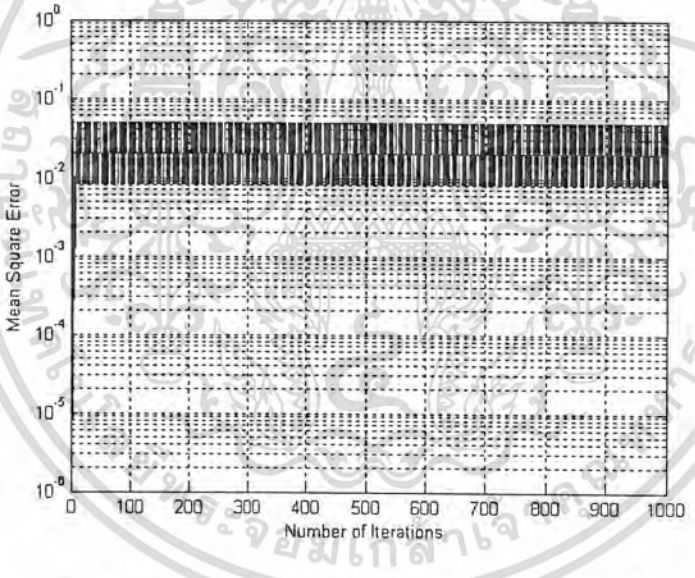


รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.10 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนายดีพีซีเอ็ม อันดับ 10

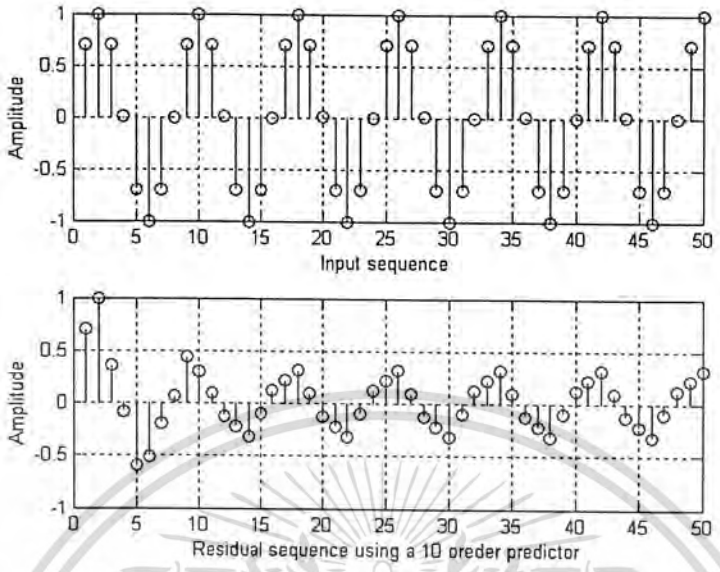
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของดีพีซีเอ็ม อันดับ 10

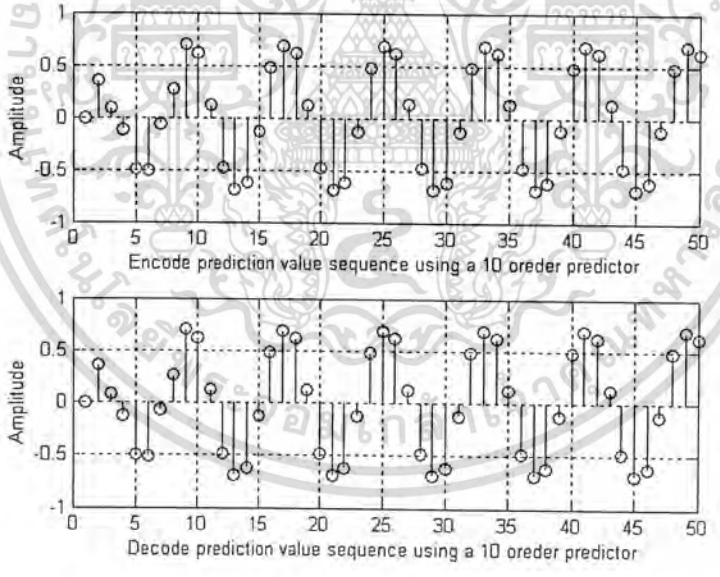
ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	0.6153586	0.2214424	0.6153586	1
27	0.7071068	0.0916908	0.0917482	0.0916908	0.7071068
28	0	-0.4856881	-0.0916908	-0.4856881	0
29	-0.7071068	-0.7785576	-0.2214186	-0.7785576	-0.7071068
30	-1	-0.6153586	-0.2214424	-0.6153586	-1
31	-0.7071068	-0.0916908	-0.0917482	-0.0916908	-0.7071068
32	0	0.4856881	0.0916908	0.4856881	0
33	0.7071068	0.7785576	0.2214186	0.7785576	0.7071068
34	1	0.6153586	0.2214424	0.6153586	1
35	0.7071068	0.0916908	0.0917482	0.0916908	0.7071068
36	0	-0.4856881	-0.0916908	-0.4856881	0
37	-0.7071068	-0.7785576	-0.2214186	-0.7785576	-0.7071068
38	-1	-0.6153586	-0.2214424	-0.6153586	-1
39	-0.7071068	-0.0916908	-0.0917482	-0.0916908	-0.7071068
40	0	0.4856881	0.0916908	0.4856881	0
41	0.7071068	0.7785576	0.2214186	0.7785576	0.7071068
42	1	0.6153586	0.2214424	0.6153586	1
43	0.7071068	0.0916908	0.0917482	0.0916908	0.7071068
44	0	-0.4856881	-0.0916908	-0.4856881	0
45	-0.7071068	-0.7785576	-0.2214186	-0.7785576	-0.7071068
46	-1	-0.6153586	-0.2214424	-0.6153586	-1
47	-0.7071068	-0.0916908	-0.0917482	-0.0916908	-0.7071068
48	0	0.4856881	0.0916908	0.4856881	0
49	0.7071068	0.7785576	0.2214186	0.7785576	0.7071068
50	1	0.6153586	0.2214424	0.6153586	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนายเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10

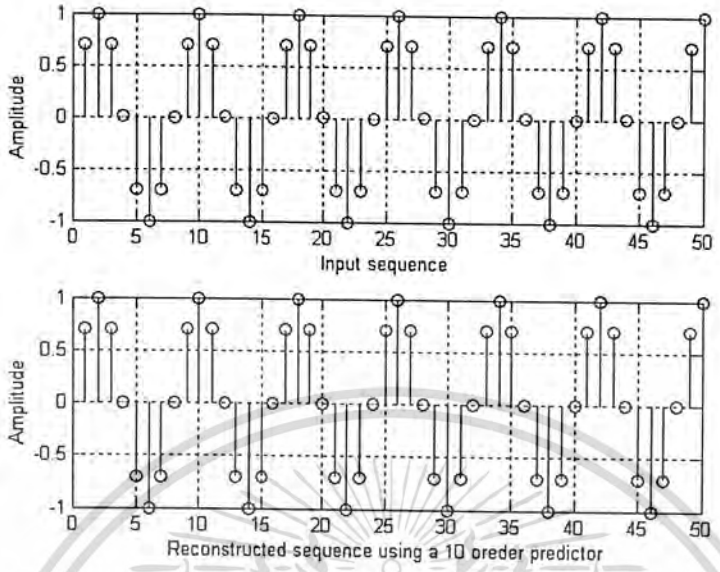


รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10

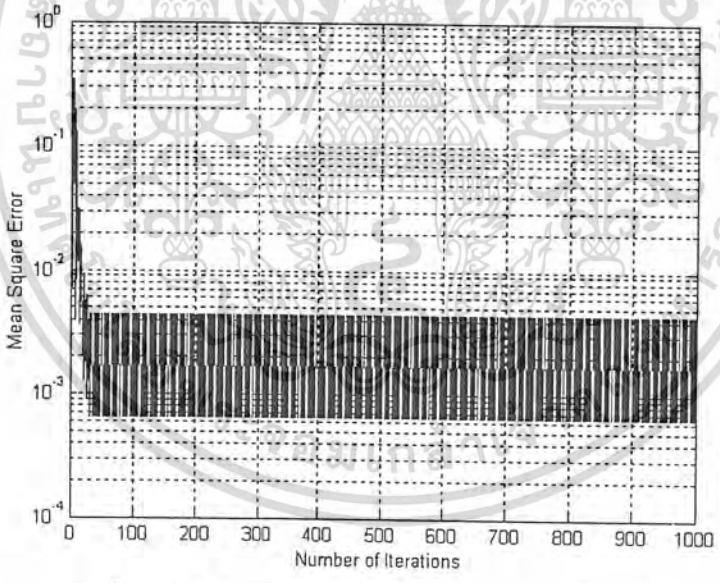


รูปที่ 4.12 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.14 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม
ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10

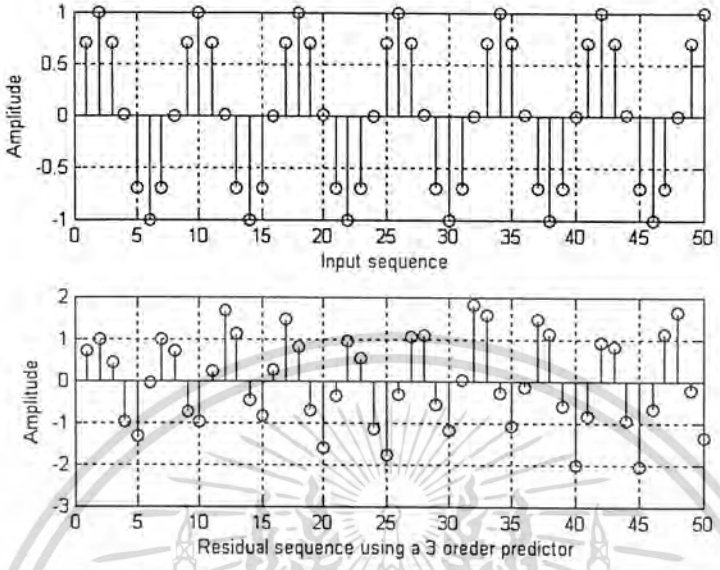
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการออโตคอรีเลชั่น อันดับ 10

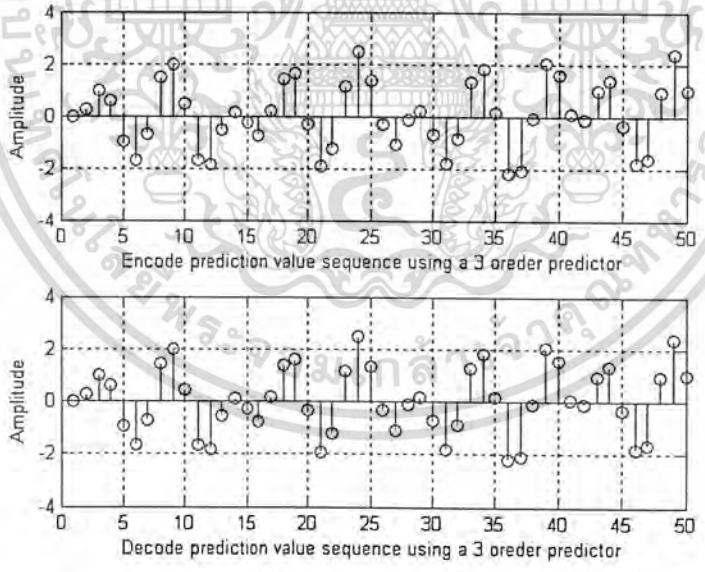
ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	0.615299	0.3169133	0.615299	1
27	0.7071068	0.125	0.0918078	0.125	0.7071068
28	0	-0.4855701	-0.125	-0.4855701	0
29	-0.7071068	-0.6830867	-0.2215367	-0.6830867	-0.7071068
30	-1	-0.615299	-0.3169133	-0.615299	-1
31	-0.7071068	-0.125	-0.0918078	-0.125	-0.7071068
32	0	0.4855701	0.125	0.4855701	0
33	0.7071068	0.6830867	0.2215367	0.6830867	0.7071068
34	1	0.615299	0.3169133	0.615299	1
35	0.7071068	0.125	0.0918078	0.125	0.7071068
36	0	-0.4855701	-0.125	-0.4855701	0
37	-0.7071068	-0.6830867	-0.2215367	-0.6830867	-0.7071068
38	-1	-0.615299	-0.3169133	-0.615299	-1
39	-0.7071068	-0.125	-0.0918078	-0.125	-0.7071068
40	0	0.4855701	0.125	0.4855701	0
41	0.7071068	0.6830867	0.2215367	0.6830867	0.7071068
42	1	0.615299	0.3169133	0.615299	1
43	0.7071068	0.125	0.0918078	0.125	0.7071068
44	0	-0.4855701	-0.125	-0.4855701	0
45	-0.7071068	-0.6830867	-0.2215367	-0.6830867	-0.7071068
46	-1	-0.615299	-0.3169133	-0.615299	-1
47	-0.7071068	-0.125	-0.0918078	-0.125	-0.7071068
48	0	0.4855701	0.125	0.4855701	0
49	0.7071068	0.6830867	0.2215367	0.6830867	0.7071068
50	1	0.615299	0.3169133	0.615299	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนายเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55

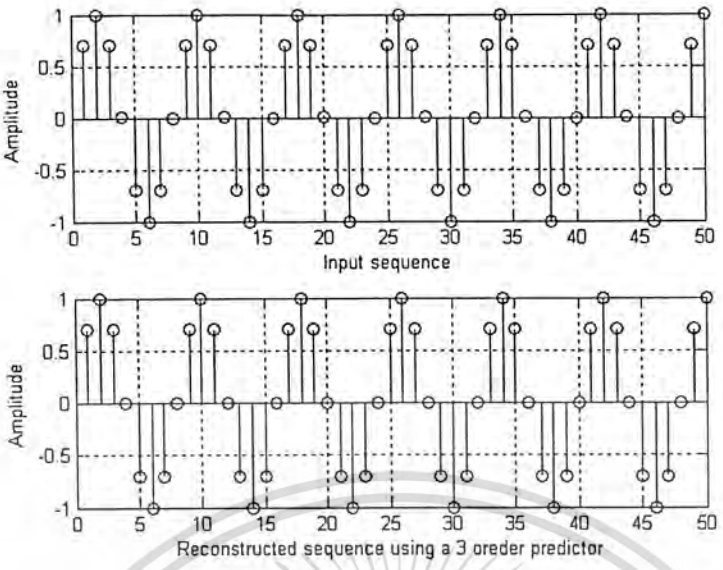


รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55

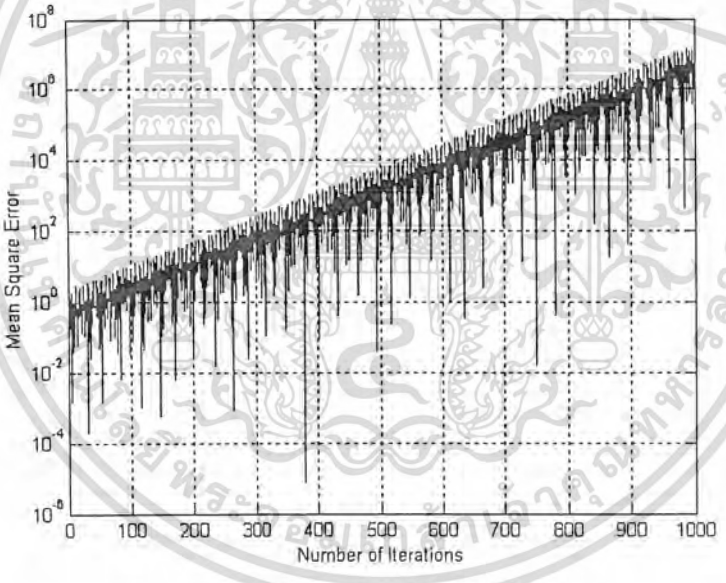


รูปที่ 4.16 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.18 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55

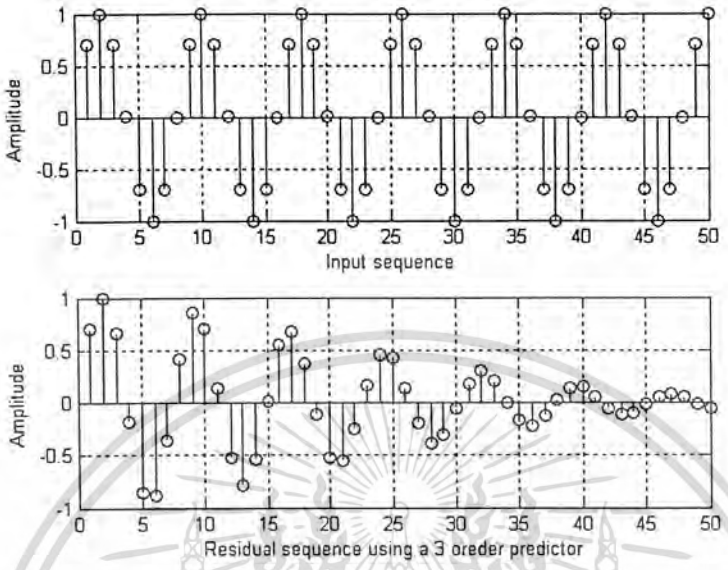
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็มด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.55

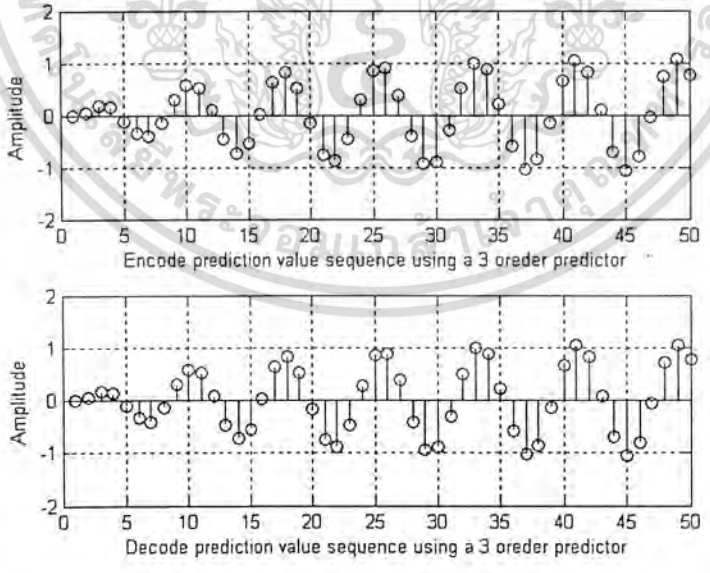
ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	-0.327767	-0.3380988	-0.327767	1
27	0.7071068	-1.09258	1.0348738	-1.09258	0.7071068
28	0	-0.1335001	1.09258	-0.1335001	0
29	-0.7071068	0.1903352	-0.5736067	0.1903352	-0.7071068
30	-1	-0.7217845	-1.1903352	-0.7217845	-1
31	-0.7071068	-1.8214724	0.0146777	-1.8214724	-0.7071068
32	0	-0.8607234	1.8214724	-0.8607234	0
33	0.7071068	1.2964668	1.5678301	1.2964668	0.7071068
34	1	1.8012323	-0.2964668	1.8012323	1
35	0.7071068	0.1579568	-1.0941256	0.1579568	0.7071068
36	0	-2.1842926	-0.1579568	-2.1842926	0
37	-0.7071068	-2.1049056	1.4771858	-2.1049056	-0.7071068
38	-1	-0.0876887	1.1049056	-0.0876887	-1
39	-0.7071068	2.0278578	-0.6194181	2.0278578	-0.7071068
40	0	1.5621713	-2.0278578	1.5621713	0
41	0.7071068	0.0740944	-0.8550646	0.0740944	0.7071068
42	1	-0.1169454	0.9259056	-0.1169454	1
43	0.7071068	0.9509908	0.8240522	0.9509908	0.7071068
44	0	1.3389396	-0.9509908	1.3389396	0
45	-0.7071068	-0.3337503	-2.0460464	-0.3337503	-0.7071068
46	-1	-1.8220917	-0.6662497	-1.8220917	-1
47	-0.7071068	-1.6359716	1.1149849	-1.6359716	-0.7071068
48	0	0.9253892	1.6359716	0.9253892	0
49	0.7071068	2.3544298	-0.2182824	2.3544298	0.7071068
50	1	0.9697088	-1.3544298	0.9697088	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนายเอดีพีซีเอ็มด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

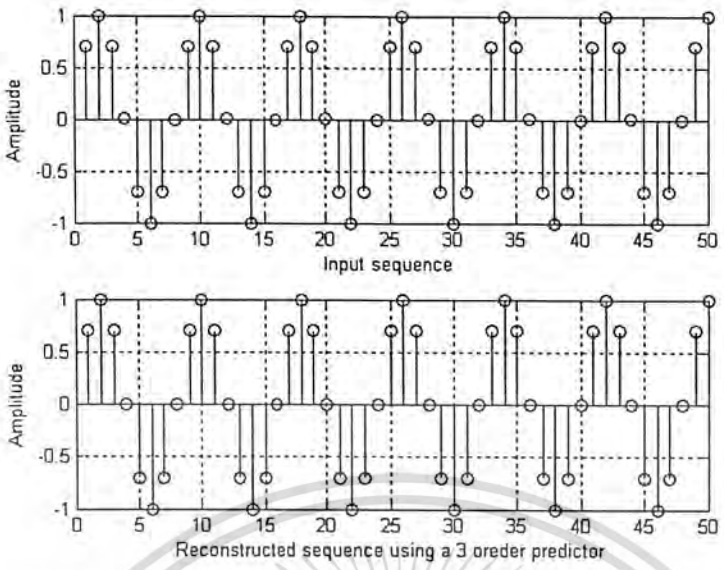


รูปที่ 4.19 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการ LMS อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

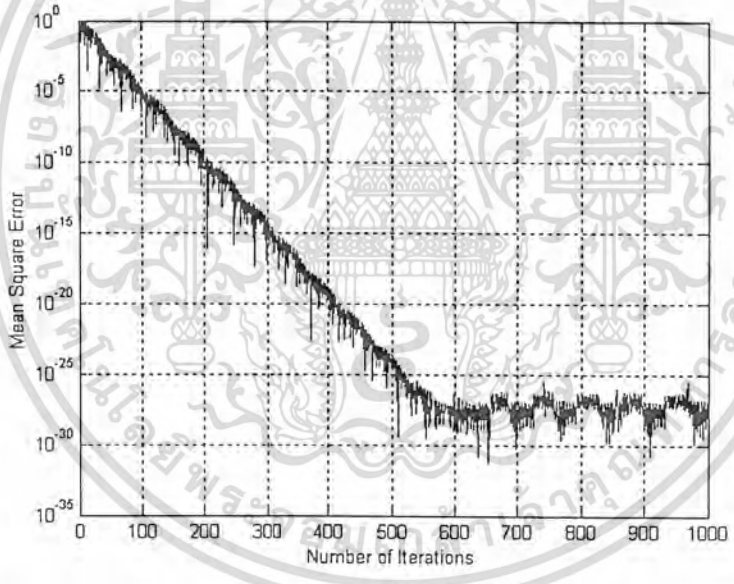


รูปที่ 4.20 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.22 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการ LMS อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

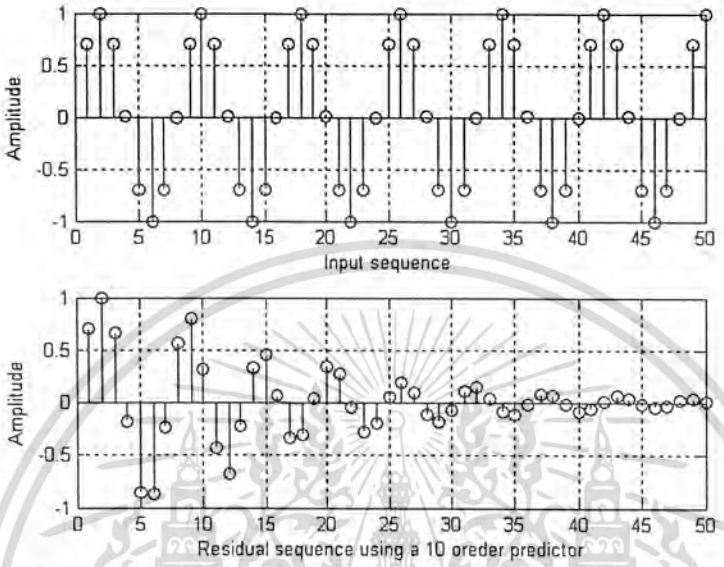
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของเอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

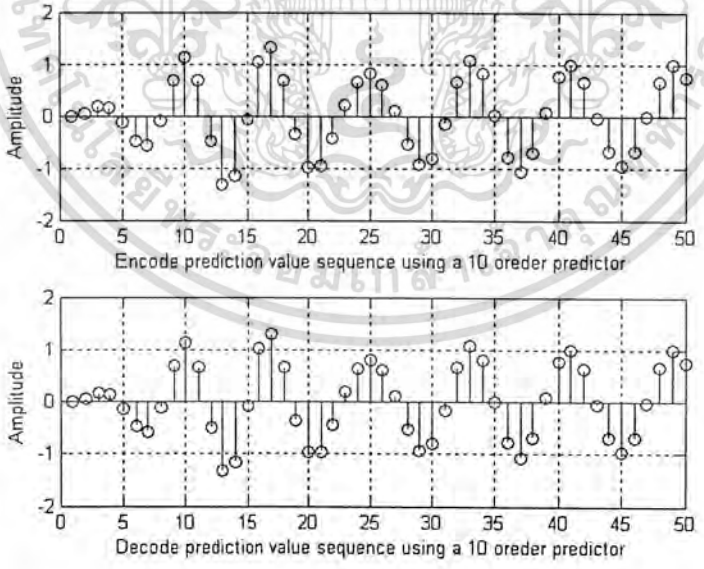
ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	0.8947985	0.1395784	0.8947985	1
27	0.7071068	0.3823249	-0.1876918	0.3823249	0.7071068
28	0	-0.4015899	-0.3823249	-0.4015899	0
29	-0.7071068	-0.9397549	-0.3055169	-0.9397549	-0.7071068
30	-1	-0.8916787	-0.0602451	-0.8916787	-1
31	-0.7071068	-0.2992376	0.184572	-0.2992376	-0.7071068
32	0	0.5036321	0.2992376	0.5036321	0
33	0.7071068	0.9957258	0.2034747	0.9957258	0.7071068
34	1	0.874039	0.0042742	0.874039	1
35	0.7071068	0.2206091	-0.1669323	0.2206091	0.7071068
36	0	-0.5862996	-0.2206091	-0.5862996	0
37	-0.7071068	-1.0319749	-0.1208071	-1.0319749	-0.7071068
38	-1	-0.8485843	0.0319749	-0.8485843	-1
39	-0.7071068	-0.1515018	0.1414775	-0.1515018	-0.7071068
40	0	0.64954	0.1515018	0.64954	0
41	0.7071068	1.0525075	0.0575667	1.0525075	0.7071068
42	1	0.8202756	-0.0525075	0.8202756	1
43	0.7071068	0.0943551	-0.1131688	0.0943551	0.7071068
44	0	-0.6949658	-0.0943551	-0.6949658	0
45	-0.7071068	-1.0612232	-0.012141	-1.0612232	-0.7071068
46	-1	-0.7925357	0.0612232	-0.7925357	-1
47	-0.7071068	-0.0497192	0.085429	-0.0497192	-0.7071068
48	0	0.7251202	0.0497192	0.7251202	0
49	0.7071068	1.0616239	-0.0180134	1.0616239	0.7071068
50	1	0.7675111	-0.0616239	0.7675111	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 ผลตอบสนองของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มแอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

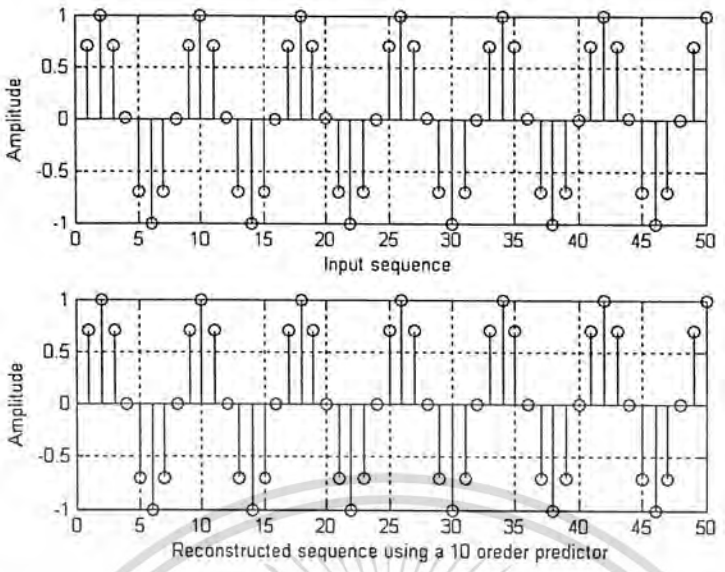


รูปที่ 4.23 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่าง ด้วยวิธีการแอลเอ็มแอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

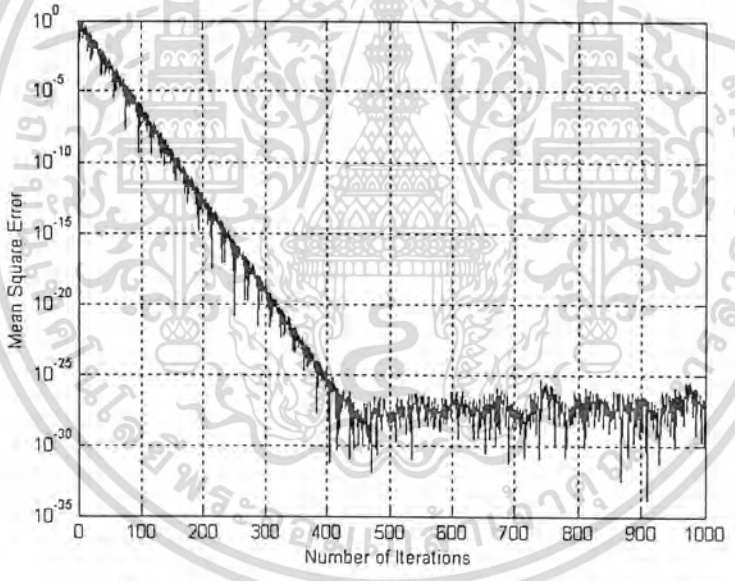


รูปที่ 4.24 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.26 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ของ เอดีพีซีเอ็ม ด้วยวิธีการแอลเอ็มเอส อันดับ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า 0.1

ลำดับสัญญาณ	สัญญาณอินพุท X_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณผลต่าง d_n	สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัส p_n	สัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมา $\hat{X}_n$
26	1	0.6070256	0.1927548	0.6070256	1
27	0.7071068	0.1053777	0.1000812	0.1053777	0.7071068
28	0	-0.52863	-0.1053777	-0.52863	0
29	-0.7071068	-0.9378235	-0.1784768	-0.9378235	-0.7071068
30	-1	-0.8133337	-0.0621765	-0.8133337	-1
31	-0.7071068	-0.1584689	0.106227	-0.1584689	-0.7071068
32	0	0.6609789	0.1584689	0.6609789	0
33	0.7071068	1.0796312	0.0461279	1.0796312	0.7071068
34	1	0.8108478	-0.0796312	0.8108478	1
35	0.7071068	0.0125386	-0.103741	0.0125386	0.7071068
36	0	-0.7859964	-0.0125386	-0.7859964	0
37	-0.7071068	-1.0705942	0.0788896	-1.0705942	-0.7071068
38	-1	-0.6945184	0.0705942	-0.6945184	-1
39	-0.7071068	0.0828471	-0.0125883	0.0828471	-0.7071068
40	0	0.7684045	-0.0828471	0.7684045	0
41	0.7071068	0.9873318	-0.0612977	0.9873318	0.7071068
42	1	0.6435028	0.0126682	0.6435028	1
43	0.7071068	-0.0443229	0.063604	-0.0443229	0.7071068
44	0	-0.6906648	0.0443229	-0.6906648	0
45	-0.7071068	-0.9548705	-0.0164419	-0.9548705	-0.7071068
46	-1	-0.6854844	-0.0451295	-0.6854844	-1
47	-0.7071068	-0.0262988	-0.0216224	-0.0262988	-0.7071068
48	0	0.6654689	0.0262988	0.6654689	0
49	0.7071068	0.9867446	0.0416379	0.9867446	0.7071068
50	1	0.7328855	0.0132554	0.7328855	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 จำลองการทำงานของควอนไทซ์เซอร์

4.2.1 ผลตอบสนองของควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัว

เมื่อกำหนดเซทตัวคูณที่ต่างกันโดยป้อนสัญญาณอินพุทที่มีการกระจายแบบ Gaussian และกำหนดขนาดระดับการควอนไทซ์เริ่มต้นเป็น 0.217

ตาราง 4.7 เปรียบเทียบค่าคิวเอสเอ็นอาร์ของควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวเมื่อเปลี่ยนเซทตัวคูณ

γ	เซทตัวคูณ	คิวเอสเอ็นอาร์ (dB)
1.05	M'_{l1}	17.812
	M'_{l2}	18.650
1.07	M''_{l1}	17.198
	M''_{l2}	18.340

4.2.2 เปรียบเทียบผลตอบสนองของควอนไทซ์แบบยูนิฟอร์มและแบบปรับตัว

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุทมีการกระจายในแบบต่าง ๆ โดยกำหนดขนาดระดับการควอนไทซ์เริ่มต้นเป็น 0.217 และใช้เซทตัวคูณ M'_{l1} สำหรับควอนไทซ์แบบปรับตัว

ตาราง 4.8 เปรียบเทียบคิวเอสเอ็นอาร์ระหว่างควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์มและแบบปรับตัว

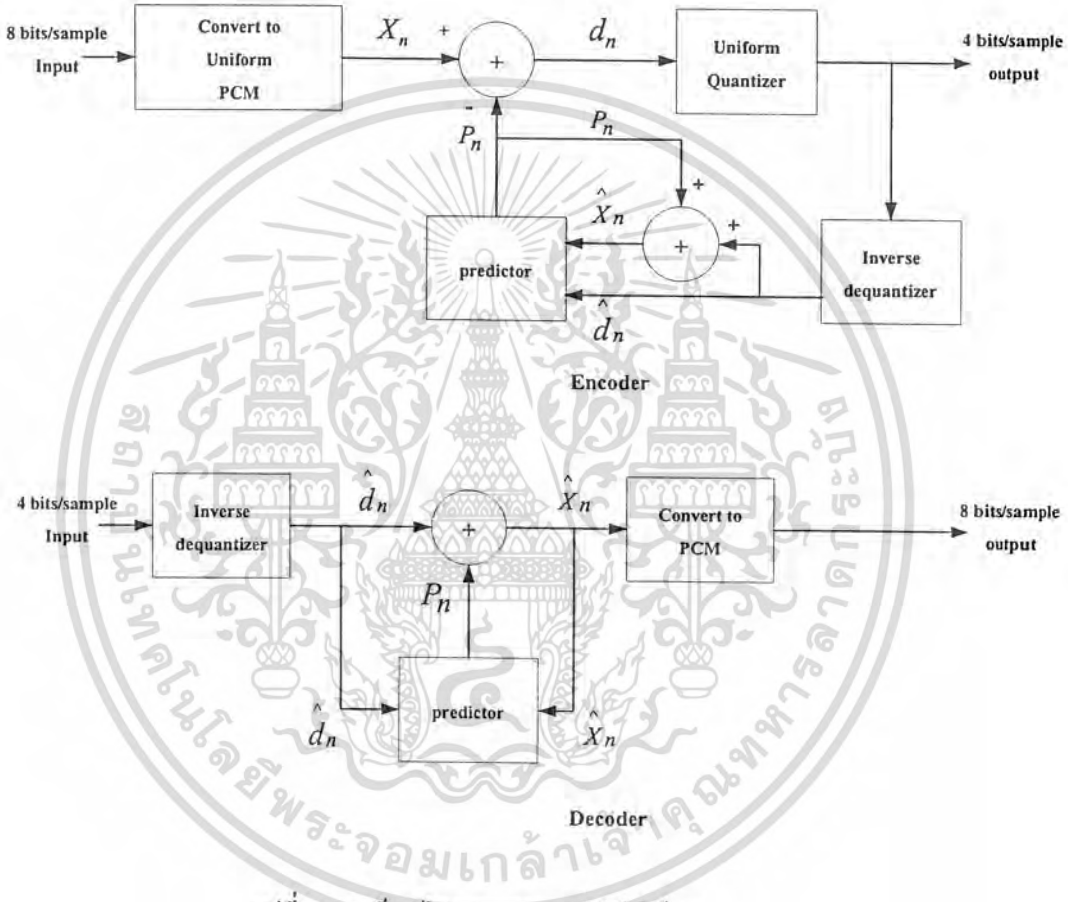
สัญญาณอินพุท	คิวเอสเอ็นอาร์	
	ควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม	ควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัว
Uniform pdf	24.086	18.774
Gaussian pdf	14.570	17.812

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 จำลองการทำงานของระบบ ดีพีซีเอ็ม และ เอดีพีซีเอ็ม

ระบบดีพีซีเอ็ม ใช้ฟังก์ชั่นการทำนายแบบคงที่อันดับ 3 และใช้ควอนไทซ์เซอร์แบบยูนิฟอร์ม 16 ระดับ (4 บิตต่อแซมเปิ้ล) ที่มีขนาดของระดับการควอนไทซ์เท่ากับ 0.125 ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.26

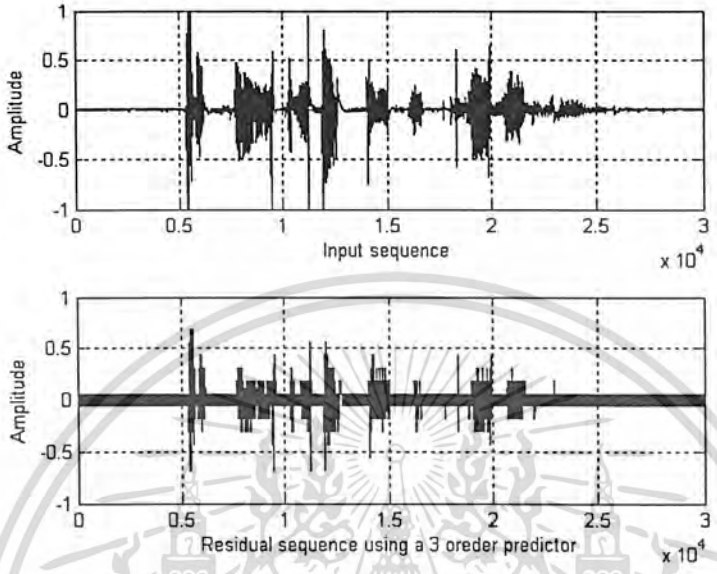
สัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณเสียงถูกแซมปลิ้งด้วยความถี่ 8,000 เฮริตซ์โดยพูดคำว่า " ทดสอบระบบบีบอัดข้อมูลเสียง "



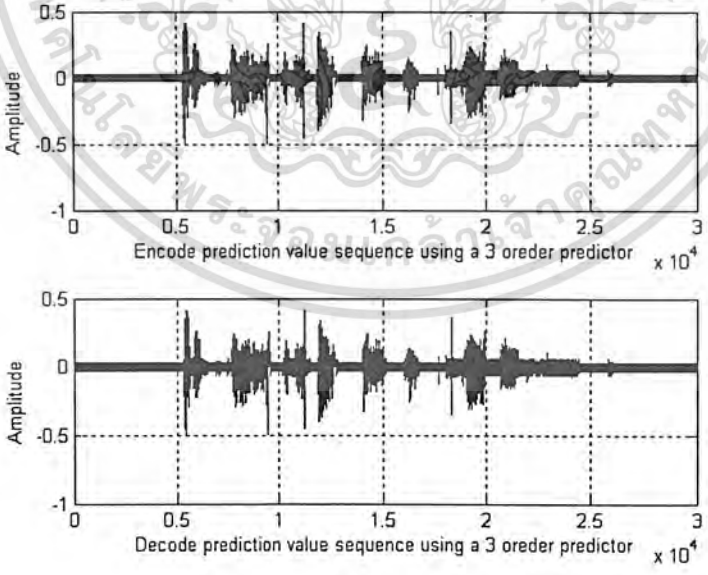
รูปที่ 4.27 บล็อกไดอะแกรมของ ดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 1

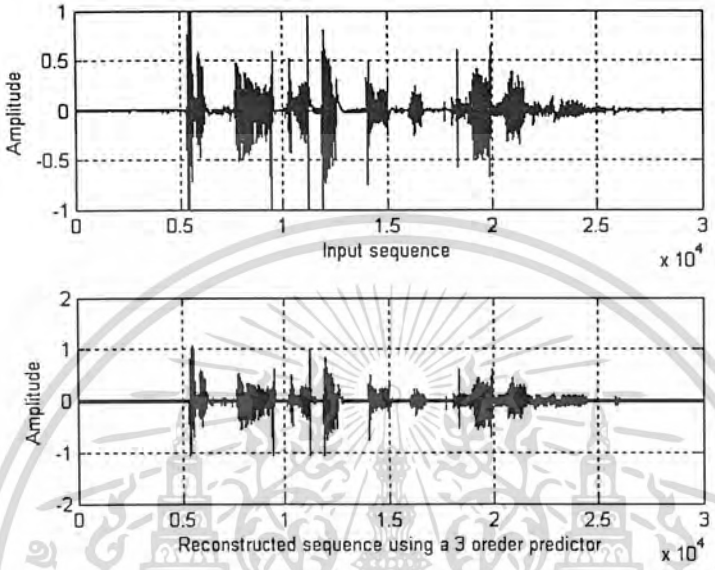


รูปที่ 4.28 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 1 ระบบดีพีซีเอ็ม

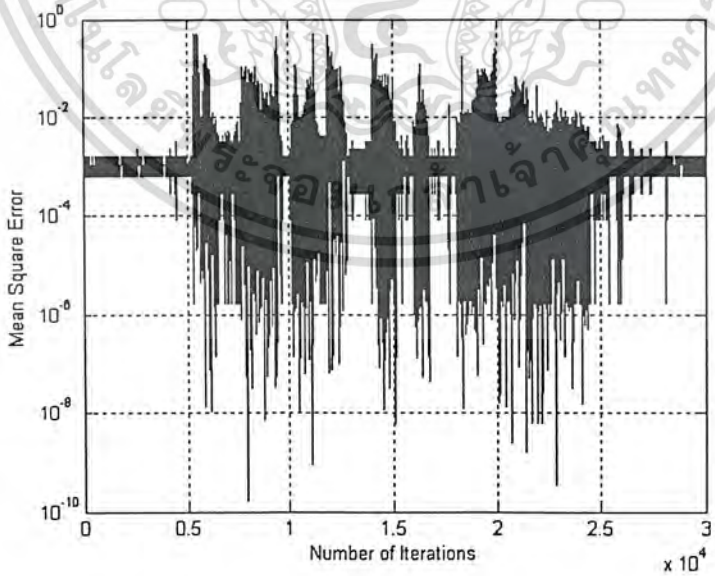


รูปที่ 4.29 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



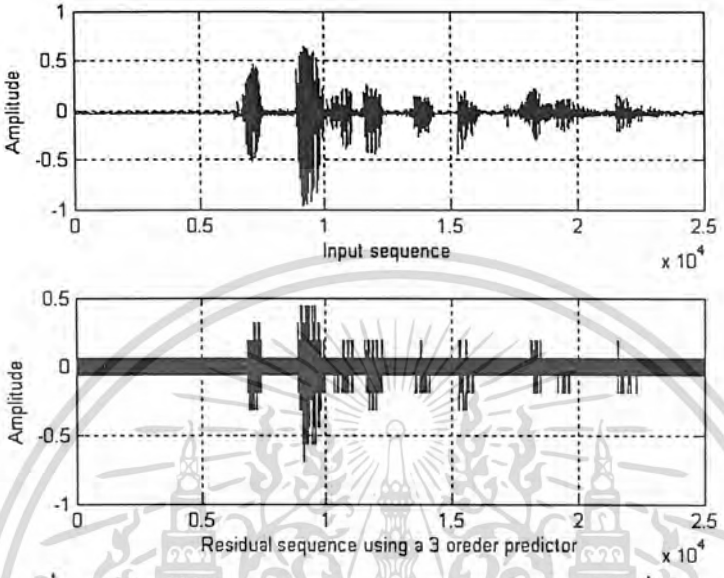
รูปที่ 4.30 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



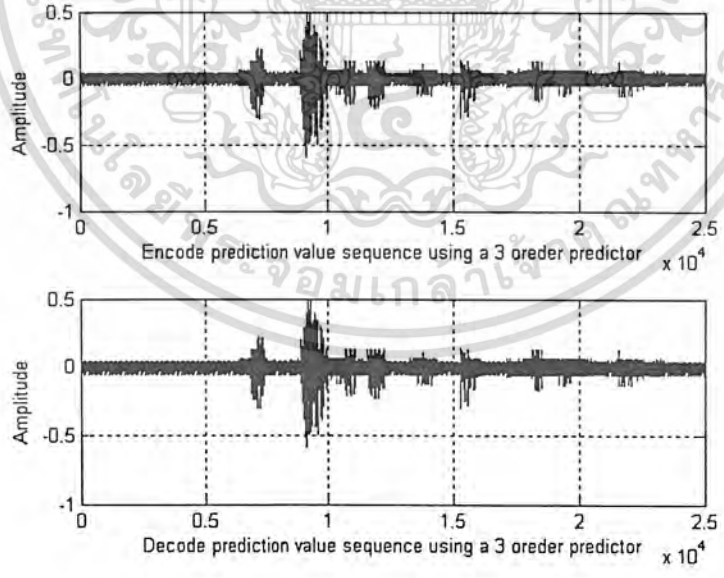
รูปที่ 4.31 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 2

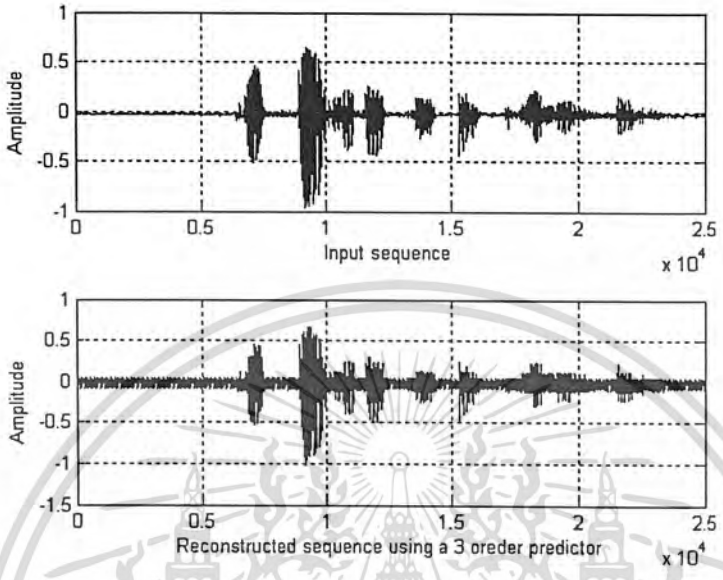


รูปที่ 4.32 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 2 ระบบ ดีพีซีเอ็ม

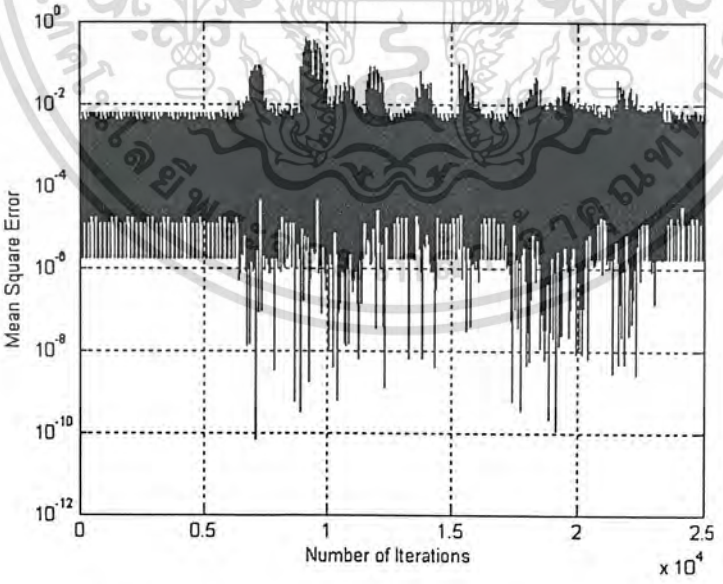


รูปที่ 4.33 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



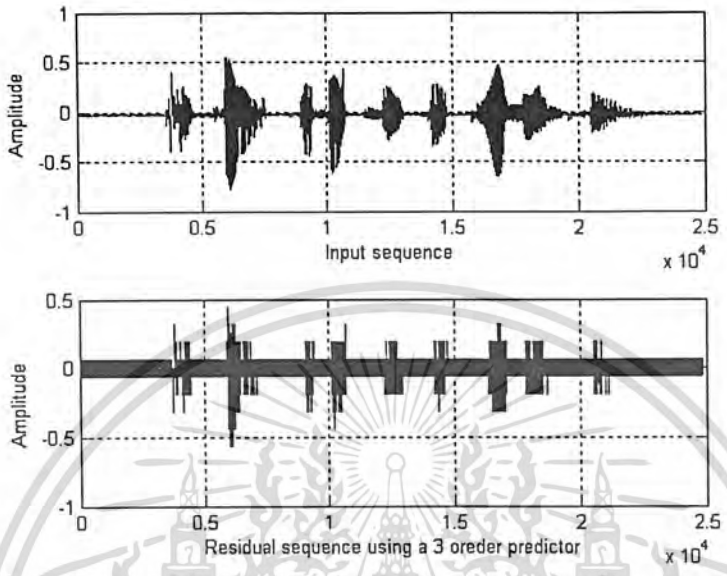
รูปที่ 4.34 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



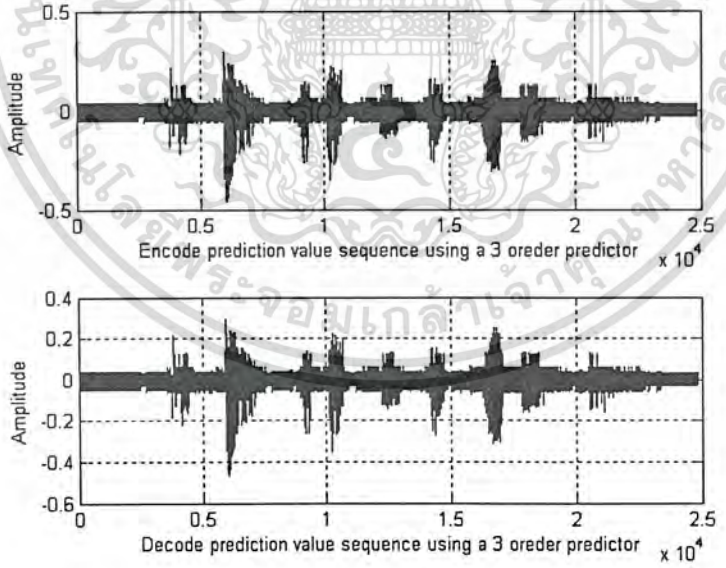
รูปที่ 4.35 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 3

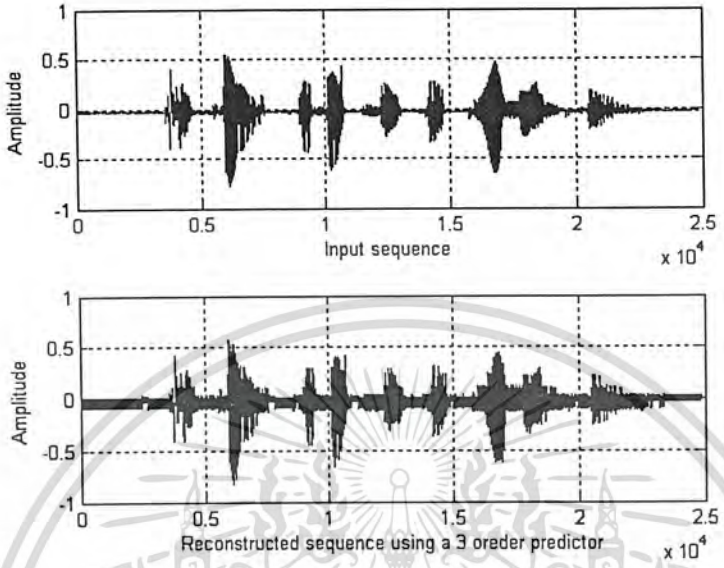


รูปที่ 4.36 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 3 ระบบ ดีพีซีเอ็ม

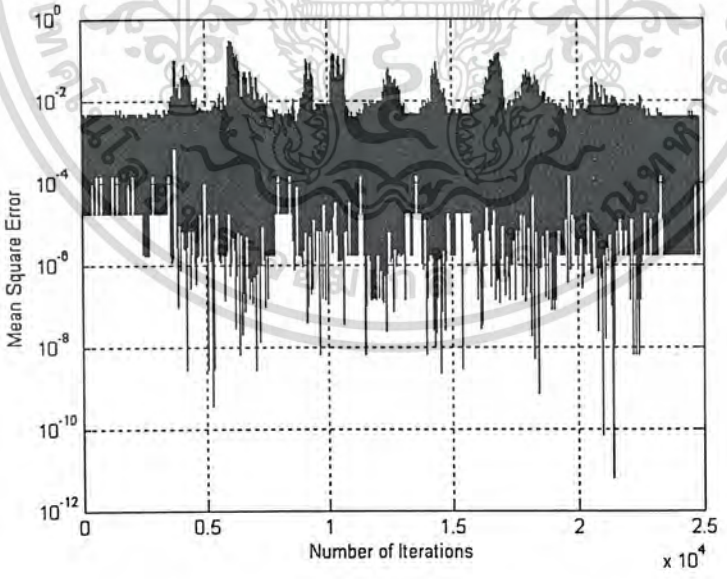


รูปที่ 4.37 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



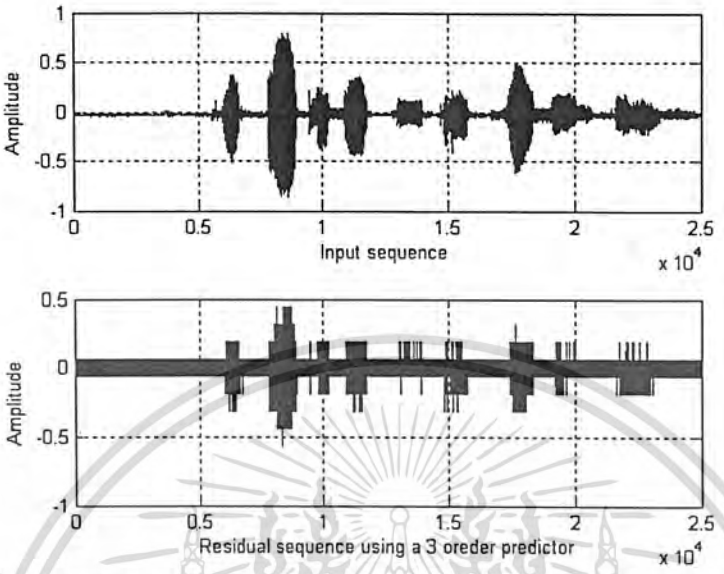
รูปที่ 4.38 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



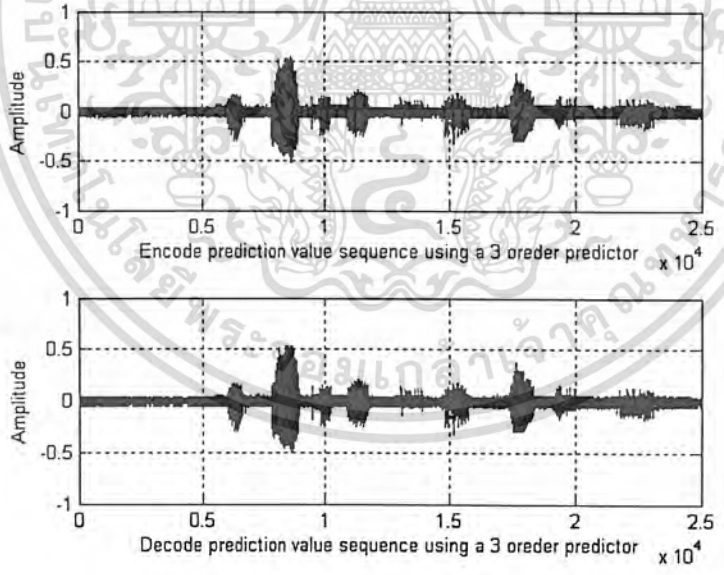
รูปที่ 4.39 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่1

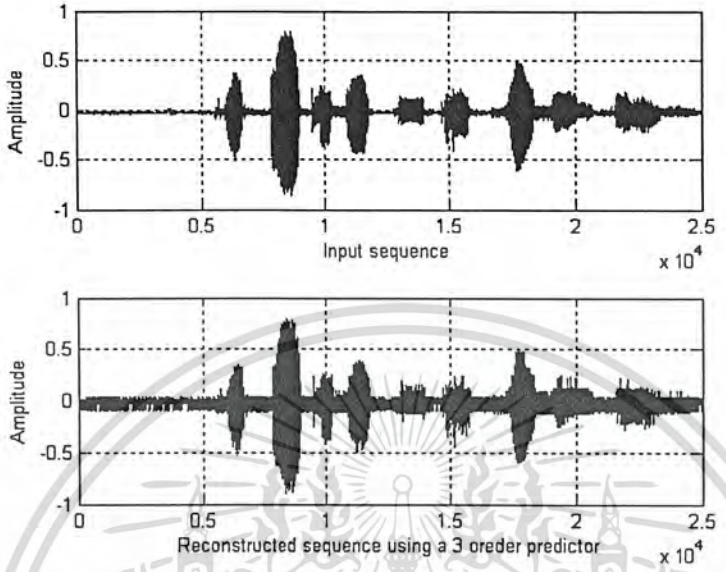


รูปที่ 4.40 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 1 ระบบ ดีพีซีเอ็ม

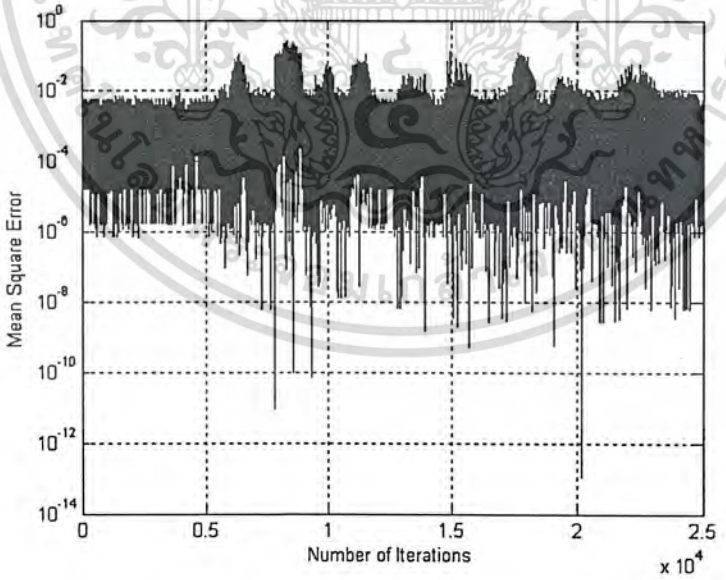


รูปที่ 4.41 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



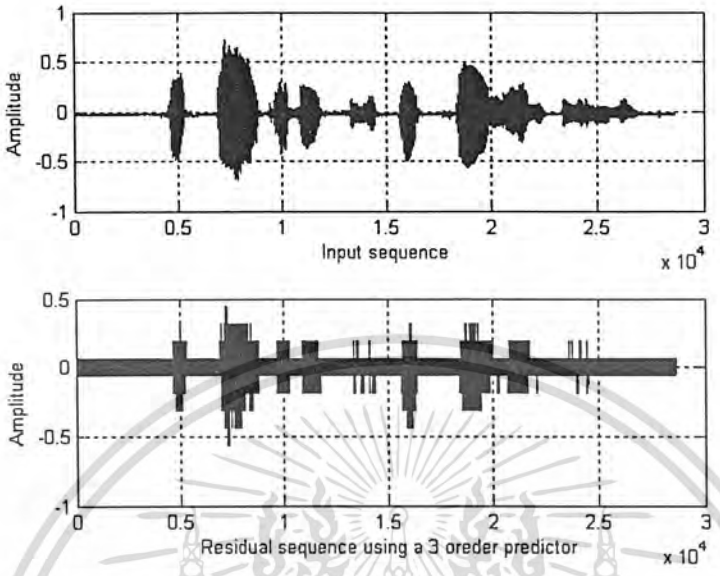
รูปที่ 4.42 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



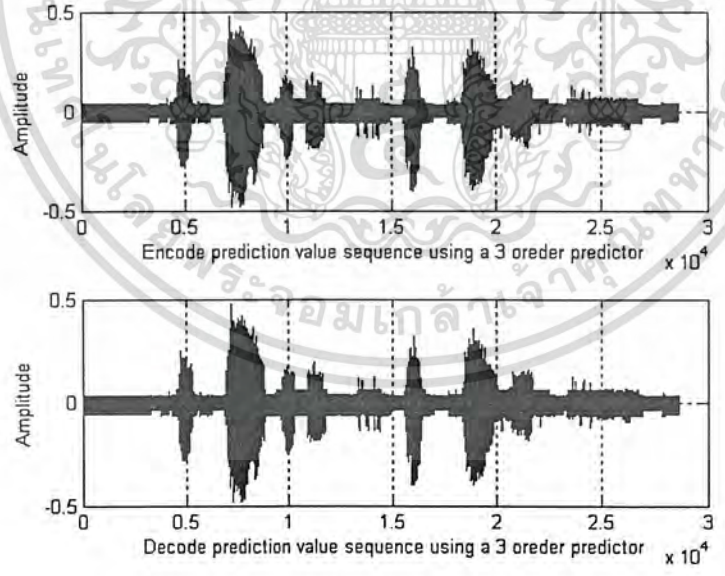
รูปที่ 4.43 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่2

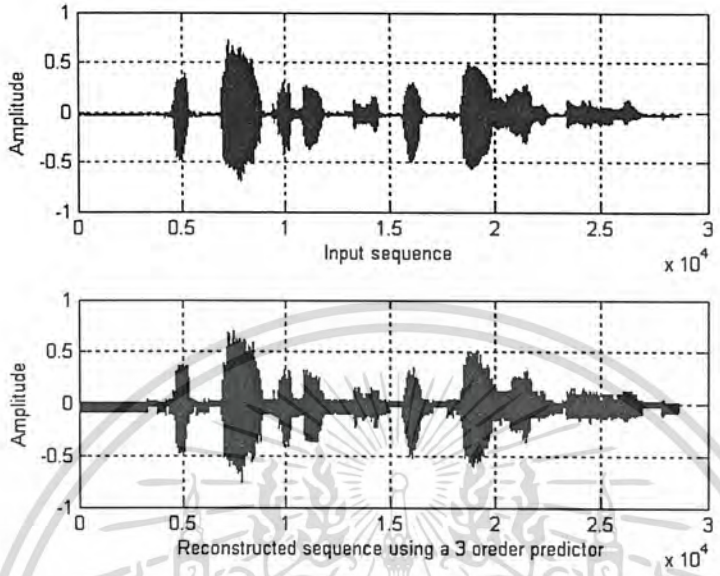


รูปที่ 4.44 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 2 ระบบ ดีพีซีเอ็ม

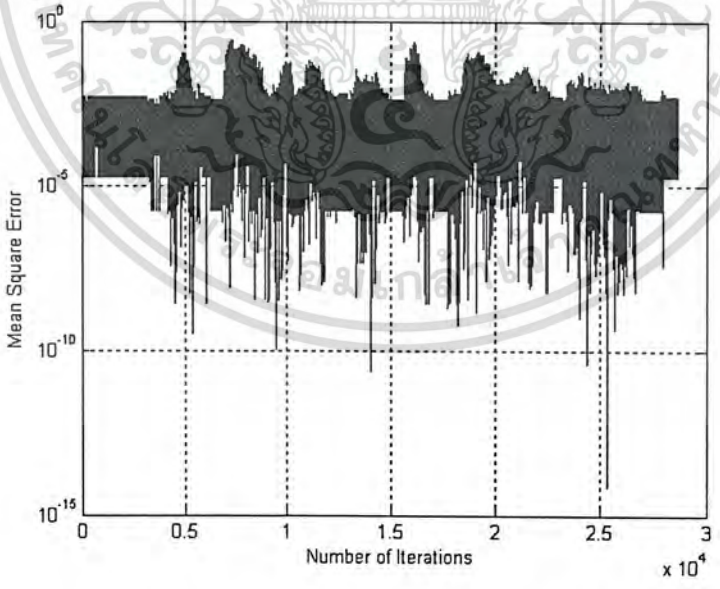


รูปที่ 4.45 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



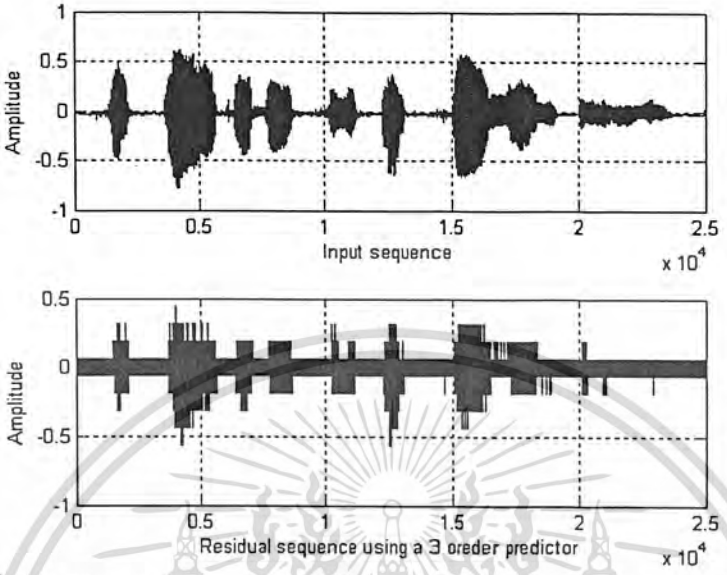
รูปที่ 4.46 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



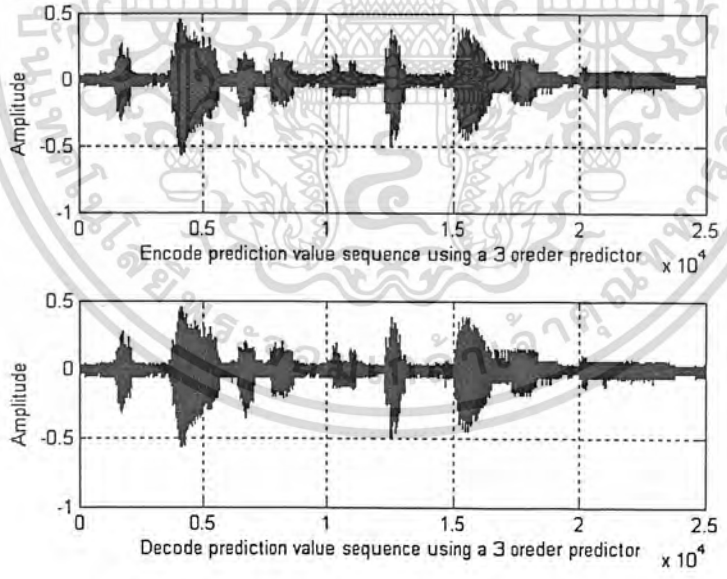
รูปที่ 4.47 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่3

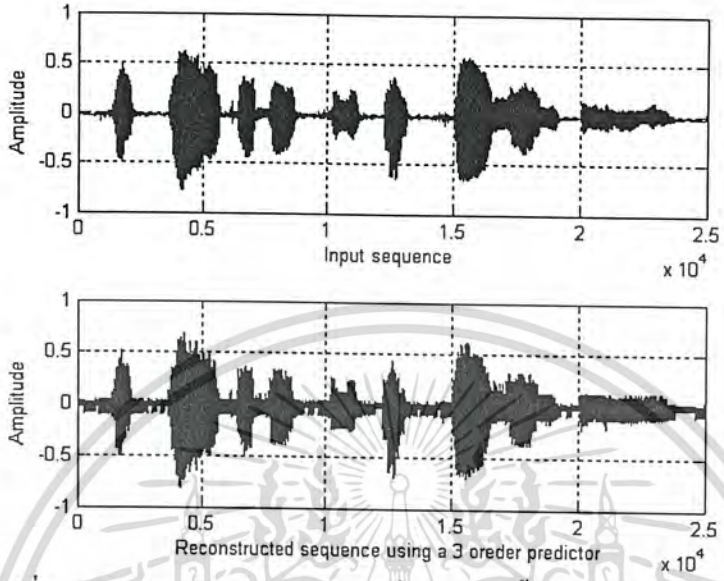


รูปที่ 4.48 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 3 ระบบ ดีพีซีเอ็ม

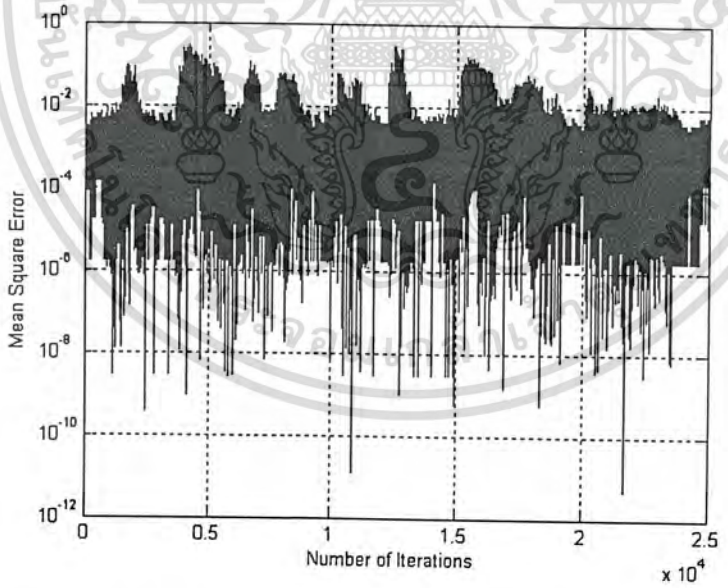


รูปที่ 4.49 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 สัญญาณอินพุทกับสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส

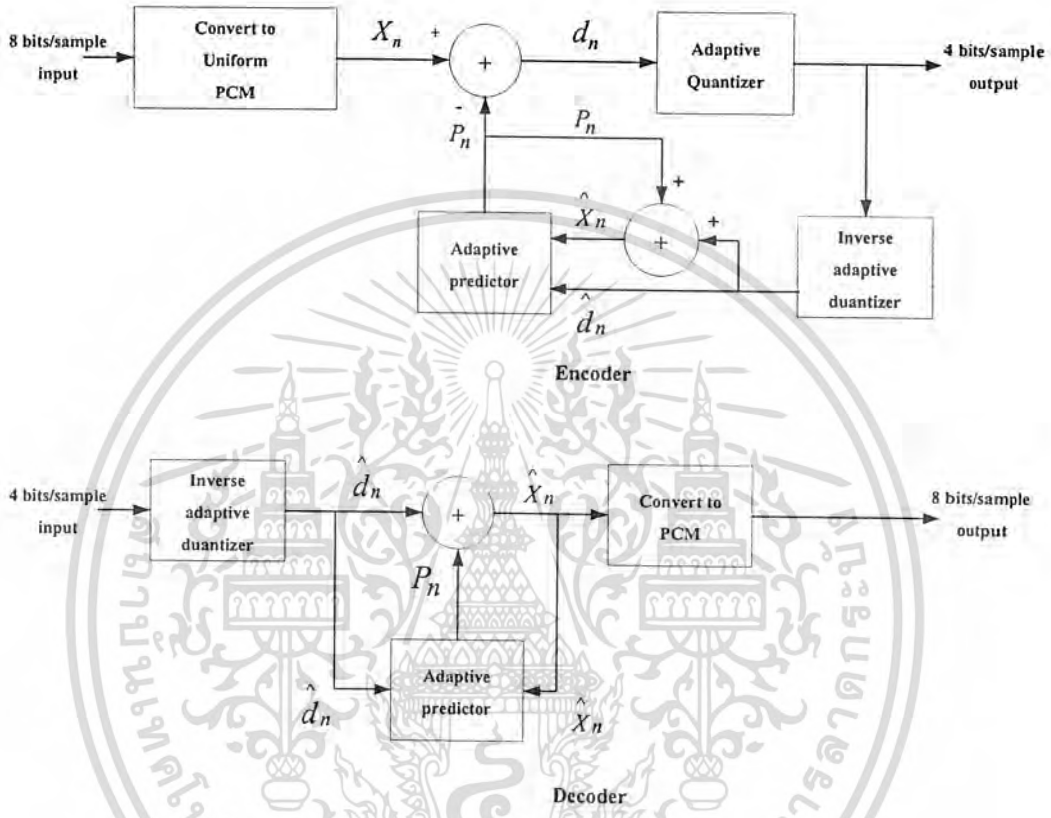


รูปที่ 4.51 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย ดีพีซีเอ็ม อันดับ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเอดีพีซีเอ็ม ใช้ฟังก์ชั่นการทำนายแบบปรับตัวอันดับ 3 สัมประสิทธิ์การลู่เข้าเท่ากับ 0.1 และใช้ควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัว 16 ระดับ (4 บิตต่อแซมเปิ้ล) โดยกำหนดขนาดระดับการควอนไทซ์เริ่มต้นเป็น 0.125 และใช้เซทตัวคูณตามตารางที่ 3.1 ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่

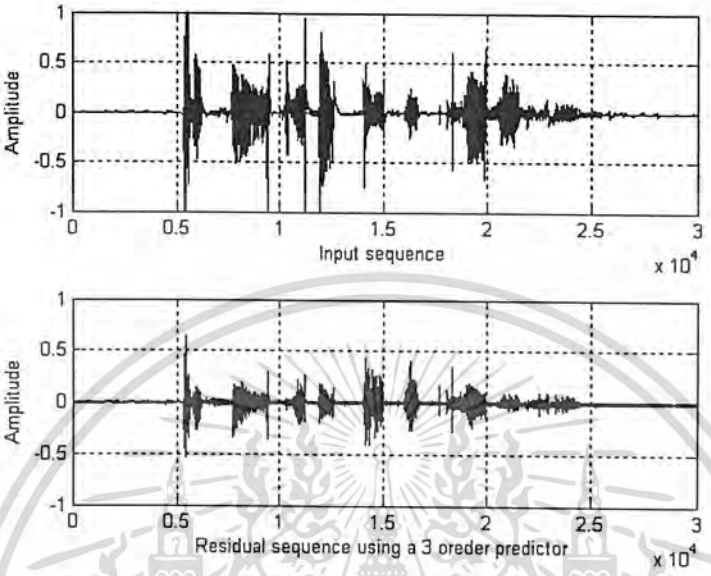
สัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณเสียงถูกแซมปลิ้งด้วยความถี่ 8,000 เฮริตซ์โดยพูดคำว่า " ทดสอบระบบบีบอัดข้อมูลเสียง "



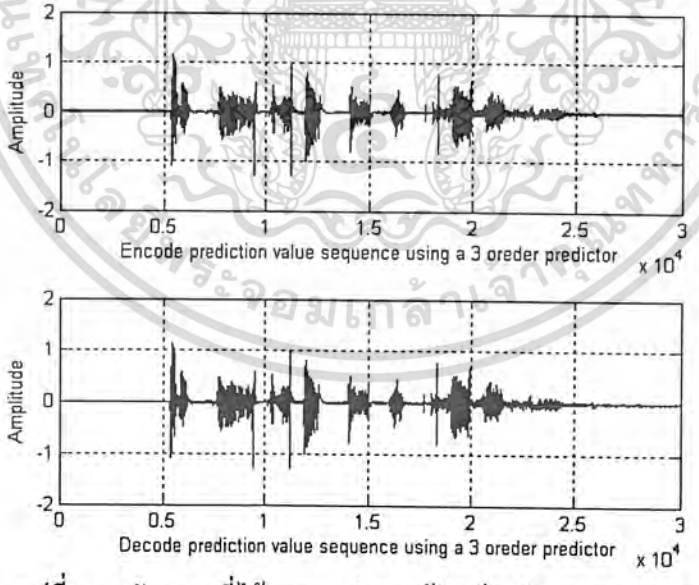
รูปที่ 4.52 บล็อกไดอะแกรมของ เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 1

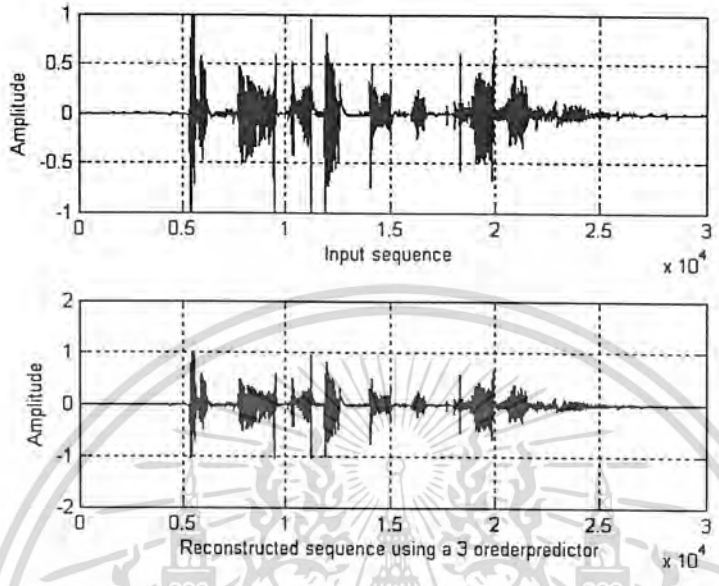


รูปที่ 4.53 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 1 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

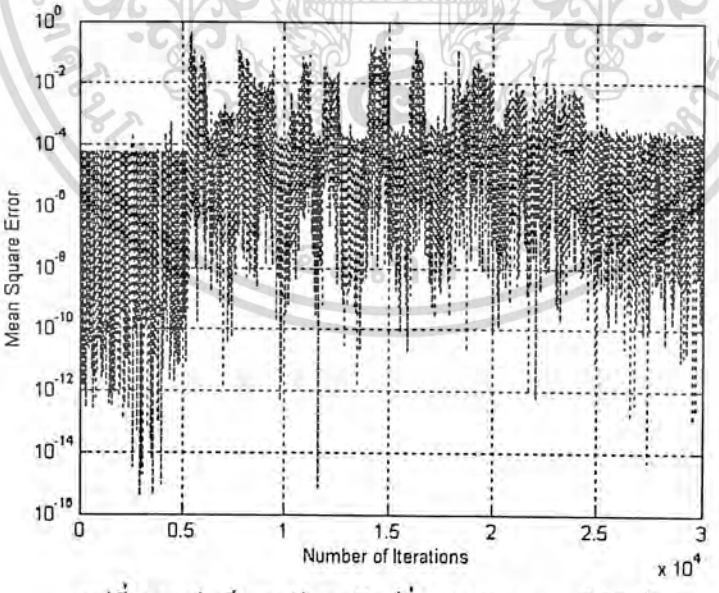


รูปที่ 4.54 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



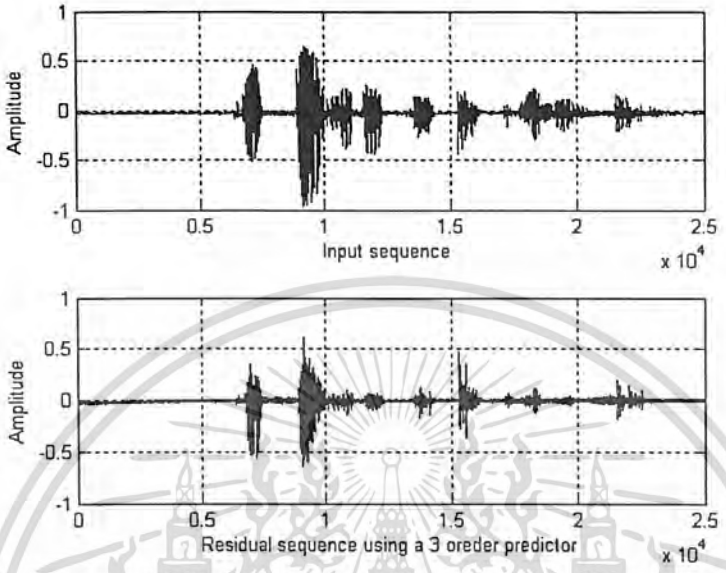
รูปที่ 4.55 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



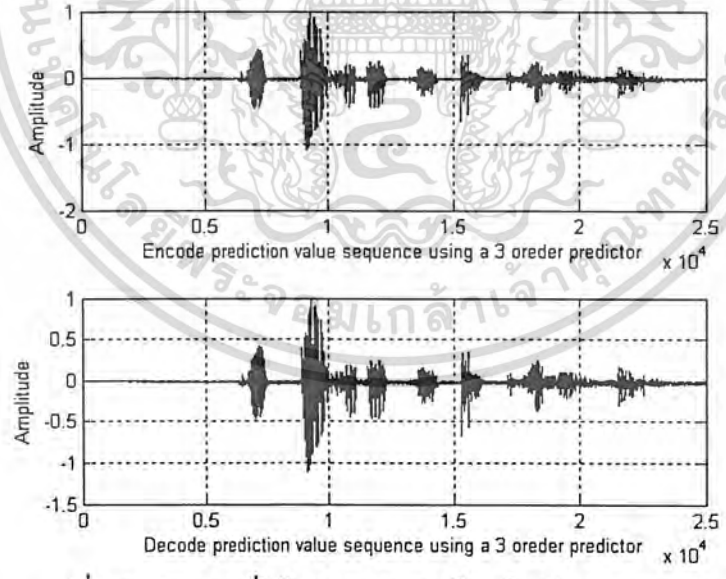
รูปที่ 4.56 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 2

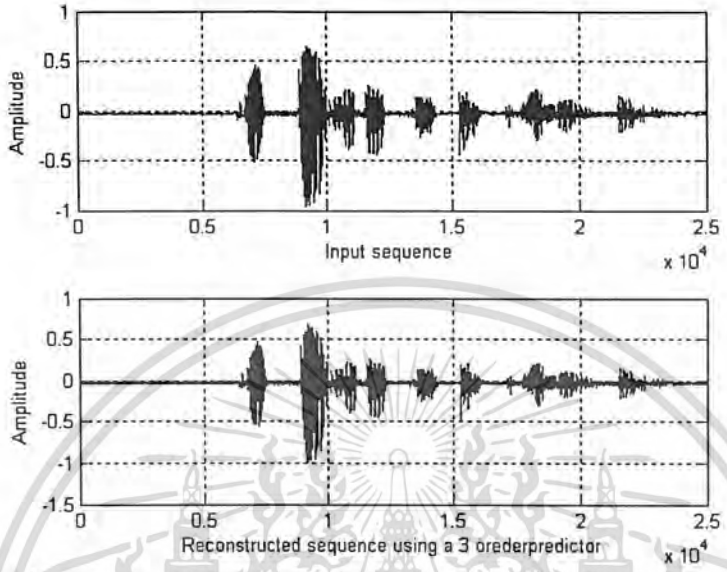


รูปที่ 4.57 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 2 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

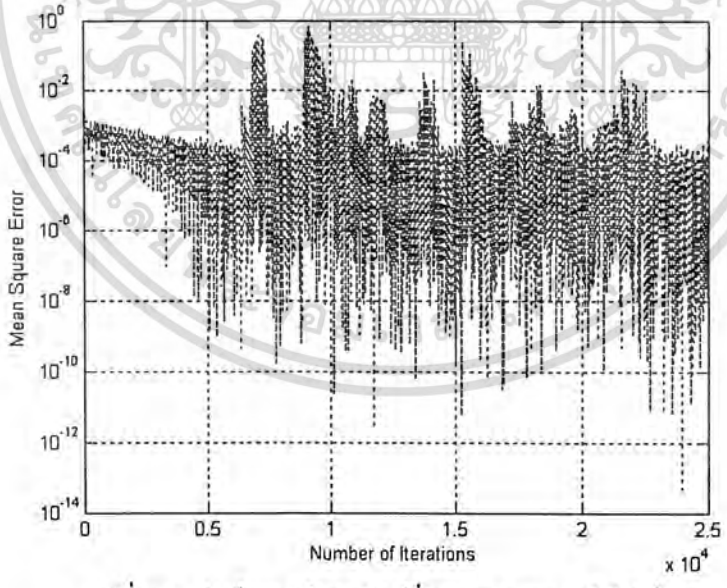


รูปที่ 4.58 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



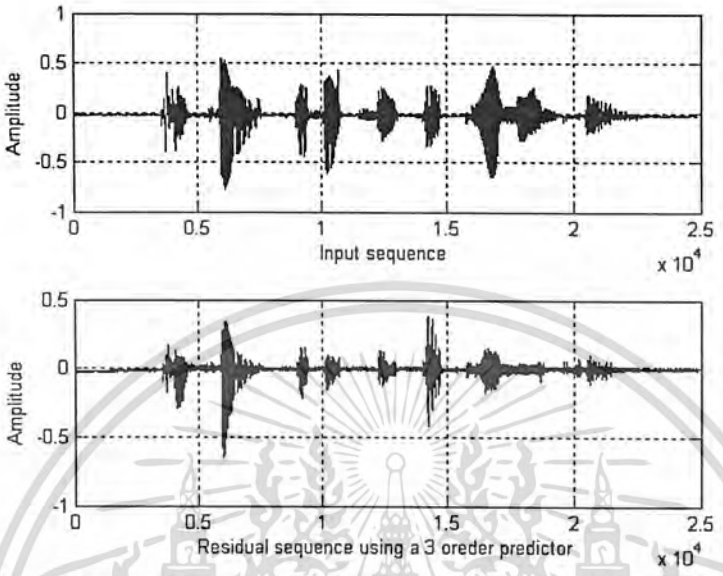
รูปที่ 4.59 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



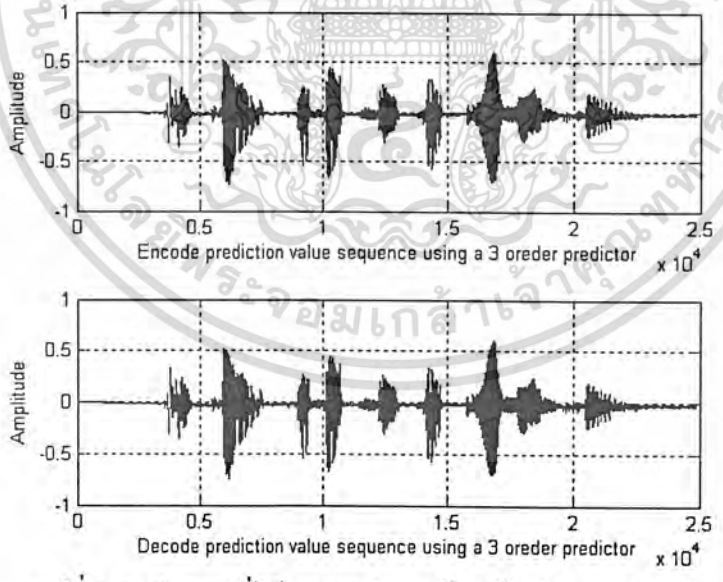
รูปที่ 4.60 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้ชายคนที่ 3

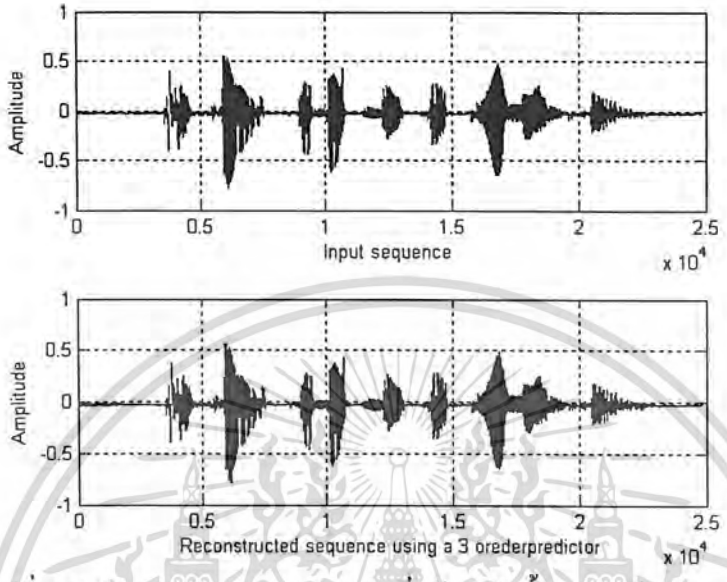


รูปที่ 4.61 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้ชายคนที่ 3 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

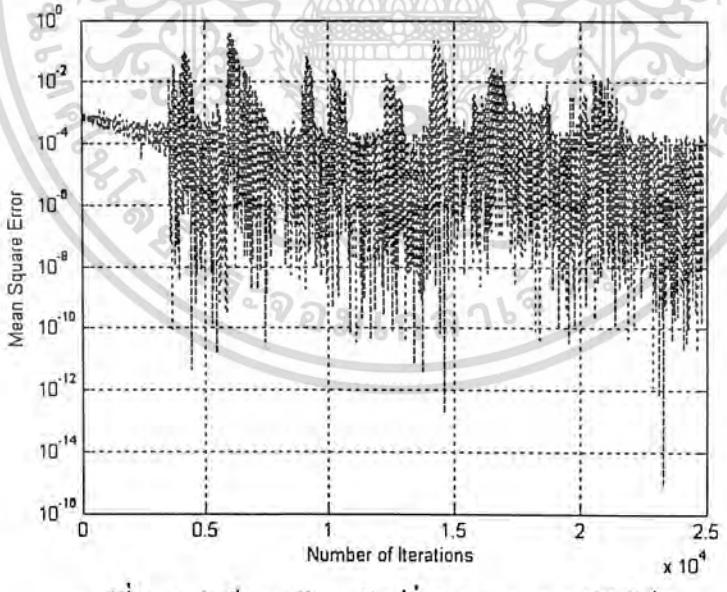


รูปที่ 4.62 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



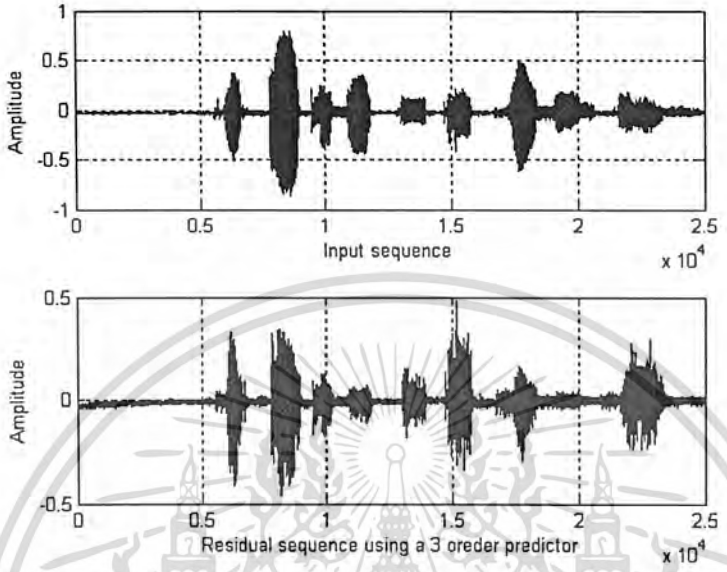
รูปที่ 4.63 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



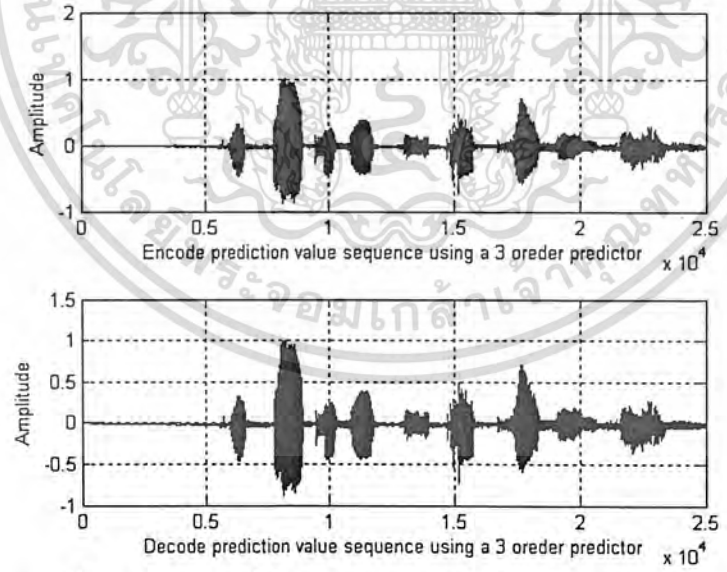
รูปที่ 4.64 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่ 1

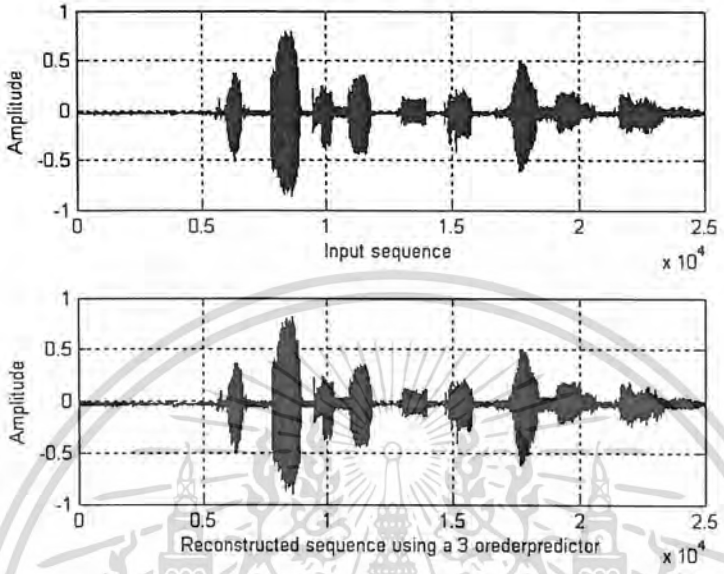


รูปที่ 4.65 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 1 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

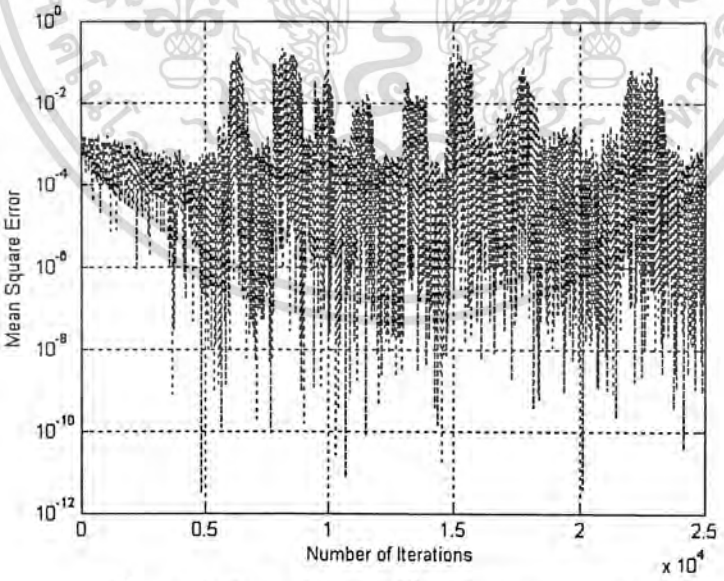


รูปที่ 4.66 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



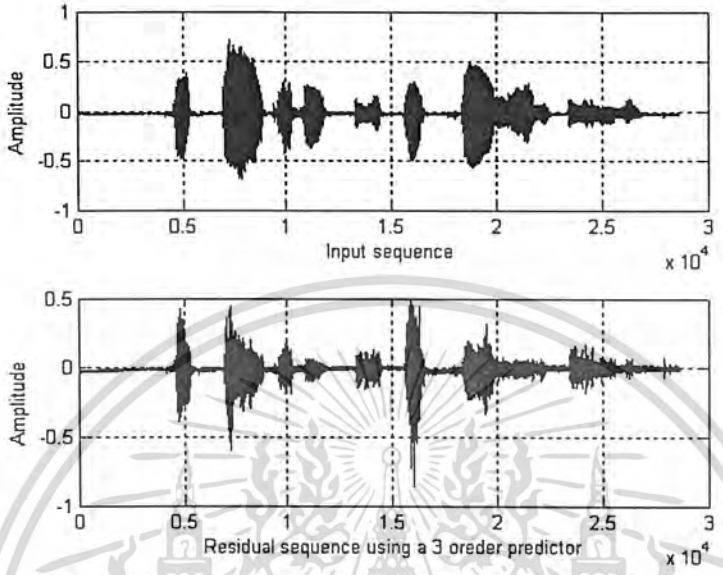
รูปที่ 4.67 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



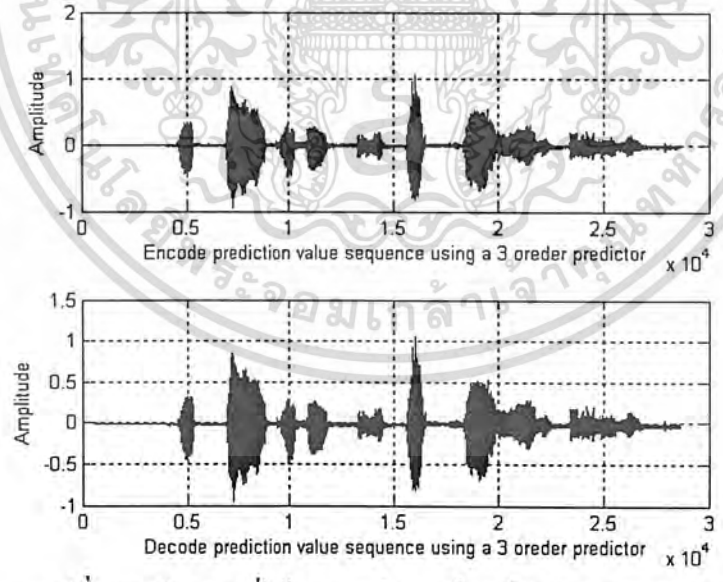
รูปที่ 4.68 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่ 2

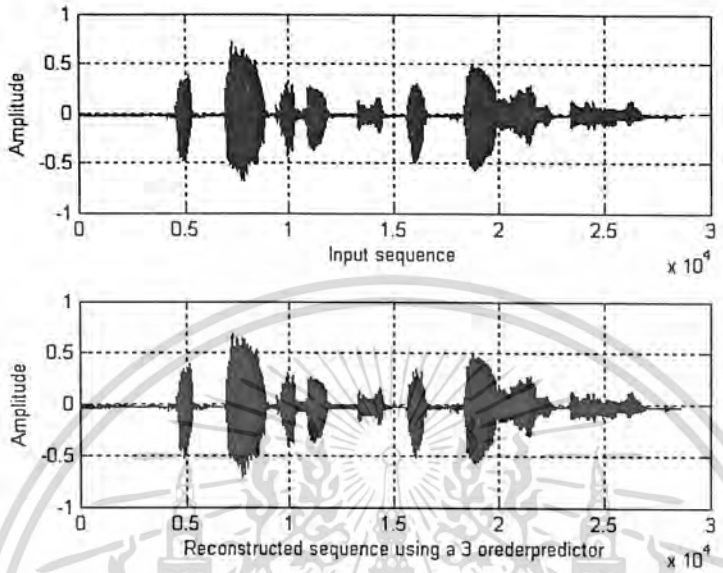


รูปที่ 4.69 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 2 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

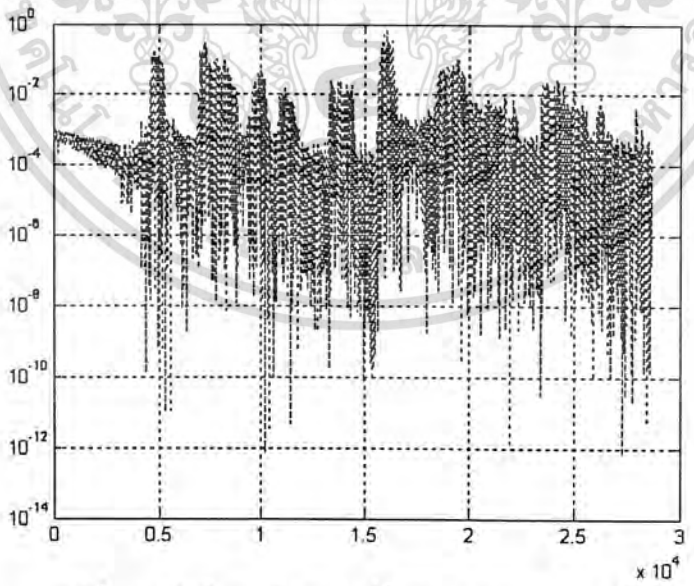


รูปที่ 4.70 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



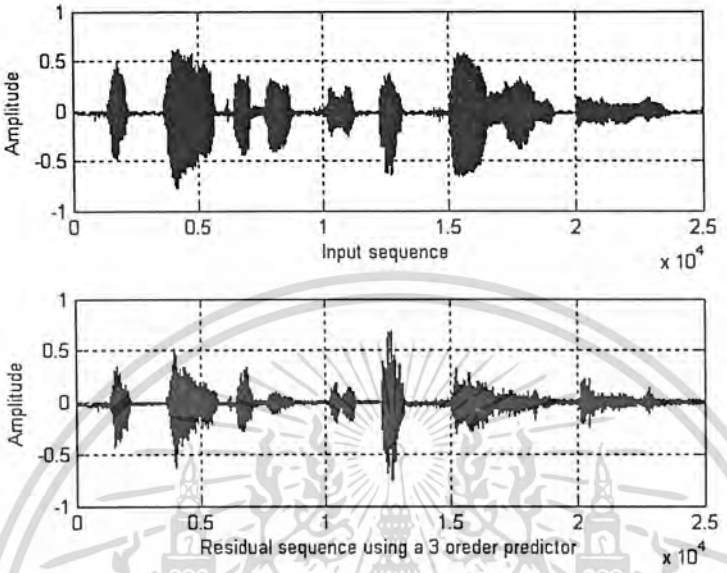
รูปที่ 4.71 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



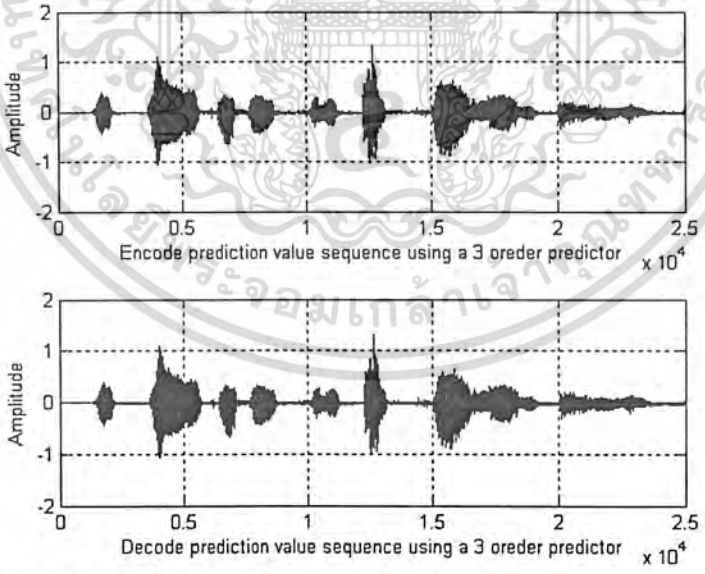
รูปที่ 4.72 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียงผู้หญิงคนที่ 3

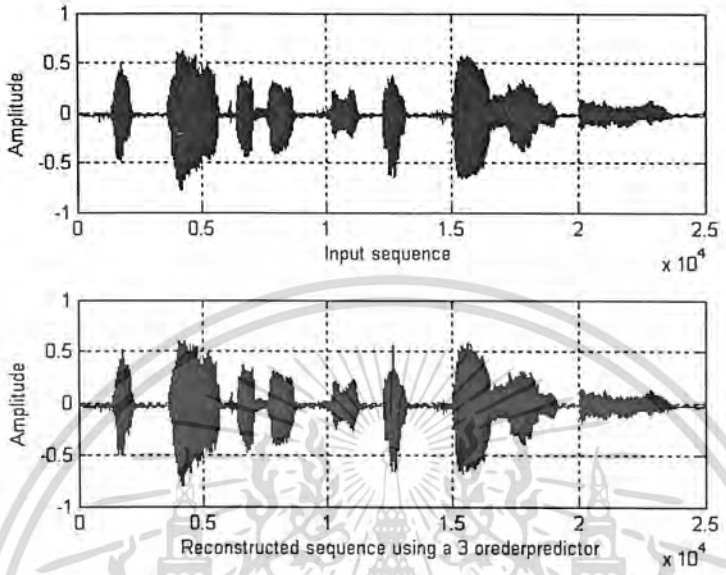


รูปที่ 4.73 สัญญาณอินพุทและสัญญาณผลต่างเสียงผู้หญิงคนที่ 3 ระบบ เอดีพีซีเอ็ม

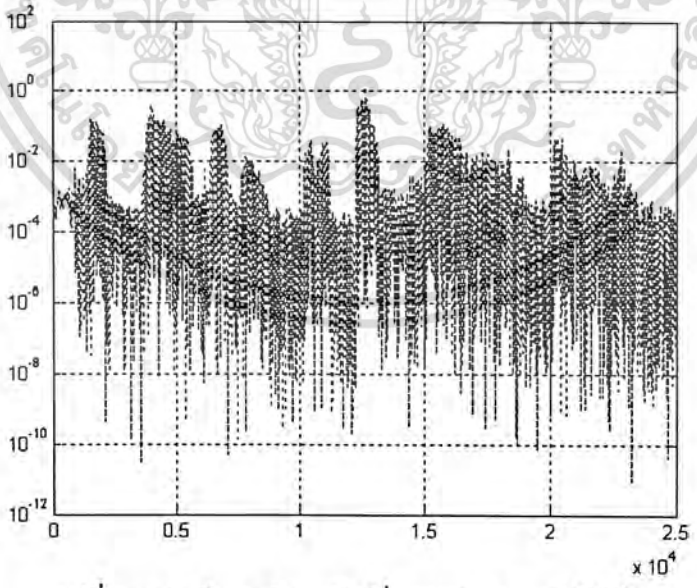


รูปที่ 4.74 สัญญาณที่ได้จากการทำนายด้านเข้ารหัสและถอดรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.75 สัญญาณอินพุทและสัญญาณที่สร้างกลับขึ้นมาทางด้านถอดรหัส



รูปที่ 4.76 ค่าเอ็มเอสอีของฟังก์ชั่นการทำนาย เอดีพีซีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.9 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และ เอดีพีซีเอ็ม ขนาด 2 บิต

สัญญาณต้นฉบับ "ทดสอบระบบบีบอัดข้อมูลเสียง"	ดีพีซีเอ็ม		เอดีพีซีเอ็ม	
	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)
ผู้ชายคนที่ 1	-1.9901	60.82	14.8063	98.35
ผู้ชายคนที่ 2	-5.3934	43	13.1819	97.2
ผู้ชายคนที่ 3	-6.1885	38.38	12.015	96.17
ผู้หญิงคนที่ 1	-2.7284	56.14	12.5549	97.06
ผู้หญิงคนที่ 2	-2.2478	58.61	11.3847	96.18
ผู้หญิงคนที่ 3	-1.7304	61.03	10.8399	95.66

ตาราง 4.10 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และ เอดีพีซีเอ็ม ขนาด 3 บิต

สัญญาณต้นฉบับ "ทดสอบระบบบีบอัดข้อมูลเสียง"	ดีพีซีเอ็ม		เอดีพีซีเอ็ม	
	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)
ผู้ชายคนที่ 1	3.9289	84.11	21.072	99.61
ผู้ชายคนที่ 2	0.2946	69.83	18.9979	99.27
ผู้ชายคนที่ 3	-0.5841	65.96	17.3442	98.89
ผู้หญิงคนที่ 1	3.0079	81.01	17.669	99.09
ผู้หญิงคนที่ 2	3.5169	82.54	16.7136	98.88
ผู้หญิงคนที่ 3	4.0675	88.44	15.3048	98.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.11 เปรียบเทียบเอสเอ็นอาร์ของระบบ ดีพีซีเอ็ม และ เอดีพีซีเอ็ม ขนาด 4 บิต

สัญญาณต้นฉบับ "ทดสอบระบบบีบอัดข้อมูลเสียง"	ดีพีซีเอ็ม		เอดีพีซีเอ็ม	
	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)	เอสเอ็นอาร์ (dB)	ความใกล้เคียงสัญญาณต้นฉบับกับสัญญาณที่สร้างกลับ (%)
ผู้ชายคนที่ 1	5.832	88.75	21.823	99.62
ผู้ชายคนที่ 2	4.946	85.73	19.915	95.27
ผู้ชายคนที่ 3	10.172	95.53	24.362	99.82
ผู้หญิงคนที่ 1	8.675	93.45	22.776	99.72
ผู้หญิงคนที่ 2	8.559	93.44	22.768	99.71
ผู้หญิงคนที่ 3	9.725	94.87	21.374	99.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และบทสรุป

ในส่วนของฟังก์ชั่นการทำนายที่ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ความถี่เบสแบนด์ 1,000 เฮิรตซ์และใช้ความถี่ในการสุ่ม 8,000 เฮิรตซ์ จะเห็นว่าการทำนายด้วยการกำหนดค่าสัมประสิทธิการทำนายคงที่ (ดีพีซีเอ็ม) อันดับ 10 จะให้ผลการทำนายที่ดีกว่าอันดับ 3 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากกราฟ เอ็มเอสอี รูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.10 เมื่อเปลี่ยนฟังก์ชั่นการทำนายเป็นแบบปรับเปลี่ยนสัมประสิทธิ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับเปลี่ยนสองวิธีคือออโตคอรีเลชั่นอัลกอริทึม และแอลเอ็มเอส อัลกอริทึม ผลที่ได้คือแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมให้ผลการทำนายดีกว่าออโตคอรีเลชั่นอัลกอริทึม โดยเปรียบเทียบได้จากกราฟ เอ็มเอสอี รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.26 จะเห็นว่าแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิการลู่เข้าให้เหมาะสมจะให้ค่าความผิดพลาดน้อยกว่าการทำนายโดยใช้ ออโตคอรีเลชั่นอัลกอริทึมเมื่อจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้น และยิ่งกว่านั้นในการออกแบบฟังก์ชั่นการทำนายด้วยออโตคอรีเลชั่นอัลกอริทึม จะต้องใช้บัฟเฟอร์มากกว่าแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมทำให้เปลืองทรัพยากรและใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า

การทำนายโดยใช้แอลเอ็มเอส อัลกอริทึมมีตัวแปรที่สำคัญคือค่าสัมประสิทธิการลู่เข้า จะต้องกำหนดให้มีค่าที่เหมาะสมตามอันดับของฟังก์ชั่นการทำนายและแอมปลิจูดของสัญญาณมิฉะนั้นจะทำให้ฟังก์ชั่นการทำนายขาดเสถียรภาพหรือลู่ออกดังกราฟ เอ็มเอสอี รูปที่ 4.18

ในส่วนของควอนไทซ์เซอร์ ในการออกแบบควอนไทซ์เซอร์จะเริ่มต้นด้วยการตั้งสมมติฐานของสัญญาณอินพุทที่ต้องการควอนไทซ์ เมื่อใดที่ป้อนสัญญาณที่ต่างไปจากสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบจะทำให้ค่าคิวเอสเอ็นอาร์ลดลงดังตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อป้อนสัญญาณที่มีการกระจายแบบเกาส์เซี่ยนให้แก่ยูนิฟอร์มควอนไทซ์เซอร์ผลที่ได้คือค่าคิวเอสเอ็นอาร์ลดลงอันเนื่องมาจากในการออกแบบยูนิฟอร์มควอนไทซ์เซอร์นั้นออกแบบบนสมติฐานว่าสัญญาณนั้นมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มที่ไม่เกิดโอเวอร์โหลด แต่การกระจายของสัญญาณแบบเกาส์เซียนนั้นมีบางส่วนที่อยู่ในช่วงโอเวอร์โหลดจึงทำให้ค่าคิวเอสเอ็นอาร์ลดลง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงเปลี่ยนไปใช้ควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัว ในการปรับตัวของควอนไทซ์เซอร์จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิตัวคูณ และความไวในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่า γ ดังตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าเซทตัวคูณ M'_{l2} จะให้ค่าคิวเอสเอ็นอาร์มากกว่าเซทตัวคูณ M'_{l1} เท่ากับ 0.8389 dB เมื่อเปรียบค่าคิวเอสเอ็นอาร์ระหว่างยูนิฟอร์มควอนไทซ์เซอร์และควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวเมื่อป้อนสัญญาณที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียนดังตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าคิวเอสเอ็นอาร์ของควอนไทซ์เซอร์แบบปรับตัวจะมากกว่า

เมื่อนำเอาแต่ละส่วนประกอบเป็นระบบ ดีพีซีเอ็ม และ เอดีพีซีเอ็ม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบโดยป้อนสัญญาณเสียงที่ถูกแซมปลิงด้วยความถี่ 8,000 เฮริตซ์ และใช้ควอนไทซ์เซอร์ 256 ระดับ (8 บิตต่อแซมเปิล) โดยใช้ฟังก์ชั่นการทำนายอันดับ 3 เท่ากัน จะเห็นว่าการบีบอัดข้อมูลทั้งสองระบบสามารถบีบข้อมูลลงได้โดยใช้รหัสไบนารี 4 บิตต่อแซมเปิลในการแทนสัญญาณ และสามารถสร้างสัญญาณเสียงกลับมาได้ ซึ่งหมายความว่าเราสามารถบีบข้อมูลลงด้วยอัตรา 2 :1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคุณภาพของเสียงที่สร้างกลับขึ้นมาจะเห็นว่าระบบเอดีพีซีเอ็มมีสัญญาณรบกวนน้อยกว่าระบบดีพีซีเอ็ม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากค่าเอสเอ็นอาร์ของระบบ และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในทั้งสองระบบนั้นล้วนเกิดมาจากควอนไทซ์เซชั่นน้อยส์ โดยเฉพาะระบบดีพีซีเอ็มที่ใช้ มิดไรซ์ควอนไทซ์เซอร์จะเกิดเสียง " ปี๊บ " ในช่วงเวลาที่ไม่มีสัญญาณเสียงอันเนื่องมาจาก มิดไรซ์ควอนไทซ์เซอร์นั้นจะไม่มีช่วงที่เอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมเอดีพีซีเอ็มด้านเข้ารหัส

```
clear variables;clc;
[x,fs,bits] = wavread('am.wav');
x = x';
x = x(1:25000);
M = length(x);
soundsc(x,fs,bits)
delta = 0.1;N =3;    % delta = Convergence Rate , N = predictor order
Rx = zeros(1,N);     % Rx = Initial of the buffer in predictor
p = 0;               % p = Initial for the frist predicted value
h = zeros(1,N);      % h = Initial for the prediction coefficient
bit = 4; mul = 1; d = 0.125; j = zeros(1,M);
H = zeros(M,4);
ms = zeros(1,M);
for n = 1:M
      e = x(n)-p;    % e = Discrete-time residual value
      [dn,mul,d,g] = Adaptive_Q(e,bit,mul,d);
      [p,h,Rx] = Adap_predictor(dn,Rx,p,h,delta,N);
      AQerror(n) = e-dn;
      j(n) = dn;              % j = Discrete-time output sequence
      pre_varTx(n) = p;
      H(n,[1:bit]) = g;       % H = Binary output sequence
      ms(n) = ms(n)+e^2;      % ms = MSE
end
soundsc(j,fs,bit)
Aqsnr_dB = 20*log10(norm(x)/norm(AQerror))
Ns=[1:M];
figure
semilogy(Ns,ms,'k:');grid;hold on;
figure
subplot(2,1,1);
plot(Ns,x,'k');grid;xlabel('Input sequence');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2);
plot(Ns,j,'k');grid;xlabel('Residual sequence using a 10 order
...predictor');ylabel('Amplitude')
```

โปรแกรมเอดีพีซีเอ็มด้านถอดรหัส

```
delta = 0.1;N = 3;
Rx = zeros(1,N);
p = 0;
h = zeros(1,N);
bit = 4;
mul = 1;
d = 0.125;
for n=1:M
      g= H(n,[1:bit]);
      [dn,mul,d] = Inadaptive_Q(g,bit,mul,d);
      [p,h,Rx] = Adap_predictor(dn,Rx,p,h,delta,N);
      pre_varRx(n) = p;
      outRx(n) = Rx(1);
end
soundsc(outRx,fs,bits)
Rv1 = corrcoef(x,outRx);
Rv1 = Rv1(1,2);
Asys_error = x-outRx;
Asys_snr_dB = 20*log10(norm(x)/norm(Asys_error))
figure
subplot(2,1,1)
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
plot(Ns,pre_varTx,'k');grid;xlabel('Encode prediction value sequence
...using a 10 oreder predictor');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(Ns,pre_varRx,'k');grid;xlabel('Decode prediction value sequence
...using a 10 oreder predictor');ylabel('Amplitude')
figure
subplot(2,1,1)
plot(Ns,x,'k');grid;xlabel('Input sequence');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(Ns,outRx,'k');grid;xlabel('Reconstructed sequence using a 10
...orederpredictor');ylabel('Amplitude')
```

โปรแกรม Adap_predictor

```
function [p,h,Rx]=Adap_predictor(dn,Rx,p,h,delta,N)
for i=N:-1:2
      Rx(i)=Rx(i-1);
end
x(1)=p+dn;
h=h+delta*dn*Rx;
p=h*Rx';                    % p = predicted value
```

โปรแกรม Adaptive_Q

```
function [dn,mul,d,g]=Adaptive_Q(e,bit,mul,d)
LEVEL=2^bit;
d=d*mul;
u=d.*[0:LEVEL-1];
q=u-((LEVEL-1)/2)*d;
if e >= 0
       inner=max(find((q-d/2 <= e)&(e <=q+d/2)));
end
if e >= q(length(q))+d/2
      inner = length(q);
end
if e <= 0
      inner=min(find((e <=q+d/2)));
       if e <= q(1)-d/2
            inner = 1;
      end
end
if LEVEL==16
      if inner==8| inner==9
            mul=0.87;
       end
      if inner==7| inner==10
            mul=0.87;
      end
      if inner==6| inner==11
            mul=0.9;
      end
      if inner==5| inner==12
            mul=1.14;
      end
      if inner==4| inner==13
            mul=1.22;
      end
      if inner==3| inner==14
            mul=1.31;
      end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      if inner==2| inner==15
            mul=1.84;
      end
      if inner==1| inner==16
            mul=2.25;
      end
      if d < 0.0027
            mul=2.25;
      end
      if d > 0.1
            mul=0.87;
      end
end
if LEVEL ==8
      if inner==4| inner==5
            mul=0.93;
      end
      if inner==3| inner==6
            mul=0.93;
      end
      if inner==2| inner==7
            mul=1.718;
      end
      if inner==1| inner==8
            mul=1.967;
      end
      if d < 0.0027
            mul=1.967;
      end
      if d > 0.1
            mul=0.93;
      end
end
if LEVEL ==4
      if inner==2| inner==3
            mul=0.8;
      end
      if inner==1| inner==4
            mul=1.6;
      end
      if d < 0.0001
            mul=1.6;
      end
      if d > 0.3
            mul=0.8;
      end
end
dn=q(inner);
index=inner-1;
g=dec2binvec(index,bit);
```

โปรแกรม Inadaptive_Q

```
function [dn,mul,d,inner]=Adaptive_Q(g,bit,mul,d)
LEVEL=2^bit;
d=d*mul;
u=d.*[0:LEVEL-1];
      q=u-((LEVEL-1)/2)*d;
index=binvec2dec(g);
inner=index+1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if LEVEL==16
      if inner==8| inner==9
            mul=0.87;
      end
      if inner==7| inner==10
            mul=0.87;
      end
      if inner==6| inner==11
            mul=0.9;
      end
      if inner==5| inner==12
            mul=1.14;
      end
      if inner==4| inner==13
            mul=1.22;
      end
      if inner==3| inner==14
            mul=1.31;
      end
      if inner==2| inner==15
            mul=1.84;
      end
      if inner==1| inner==16
            mul=2.25;
      end
      if d < 0.0027
            mul=2.25;
      end
      if d > 0.1
            mul=0.87;
      end
end
if LEVEL ==8
      if inner==4| inner==5
            mul=0.93;
      end
      if inner==3| inner==6
            mul=0.93;
      end
      if inner==2| inner==7
            mul=1.718;
      end
      if inner==1| inner==8
            mul=1.967;
      end
      if d < 0.0027
            mul=1.967;
      end
      if d > 0.1
            mul=0.93;
      end
end
if LEVEL ==4
      if inner==2| inner==3
            mul=0.8;
      end
      if inner==1| inner==4
            mul=1.6;
      end
      if d < 0.0001
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            mul=1.6;
        end
        if d > 0.3
            mul=0.8;
        end
end
dn=q(inner);
```

โปรแกรมดีพีซีเอ็มด้านเข้ารหัส

```
clear variables;clc;
[x,fs,bits]= wavread('om2.wav');
x=x';
x=x(1:25000);
soundsc(x,fs)
Ns=[1:1:length(x)];
xn=length(x);
k=3;
M=4;
B=zeros(1,M);
p=0;
r=zeros(1,k+1);
bit=3;
LEVEL=2^bit;
j=zeros(1,xn);
R=zeros(k);
Dxx=0;
ms=zeros(1,xn);
for n=1:xn
    e=x(n)-p ;
    error(n)=e;
    [dn,inner,index]=uniformQ(e,LEVEL);
    Qerror(n)=dn-e;
    Y(n)=dn;
    dn=dn+p;
    xxn(n)=dn;
    for i=M:-1:2
        B(i)=B(i-1);
    end
    B(1)=dn;
    for j=0:1:k
        Dxx=zeros(1,M-j);
        for i=1:M-j
            D=(B(i)*B(i+j));
            Dxx(i)=D;
        end
        r(j+1)sum(Dxx);
    end
    A=[0.9871 -0.1521 -0.2322]';
    G=B(1:k);
    p=G*A;
    pre_varTX(n)=p;
    ms(n)=ms(n)+error(n)^2;
    H(n,[1:bit])=dec2binvec(index,bit);
end
figure
subplot(2,1,1)
plot(Ns,x,'k');grid;xlabel('Input sequence');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
plot(Ns,Y,'k');grid;xlabel('Residual sequence using a 3 oreder
...predictor');ylabel('Amplitude')
soundsc(Y,fs,bit)
figure
semilogy(ms,'k');xlabel('Number of Iterations');ylabel('Mean Square
...Error');grid;
```

โปรแกรมดีพีซีเอ็มด้านถอดรหัส

```
clc;
yyn=length(Y);
BB=zeros(1,M);
pp=zeros(1,1);
r=zeros(1,k+1);
bit=3;
LEVEL=2^bit;
j=zeros(1,xn);
R=zeros(k);
for n=1:1:yyn
      index=binvec2dec(H(n,[1:bit]));
      inner=index+1;
      [dn]=Inuniform_Q(inner,LEVEL);
      dn=Y(n)+pp;
      out(n)=dn;
      for i=M:-1:2
            BB(i)=BB(i-1);
      end
      BB(1)=dn;
      for j=0:1:k
            Dxx=zeros(1,M-j);
            for i=1:M-j
                  D=(B(i)*B(i+j));
                  Dxx(i)=D;
            end
            r(j+1)=sum(Dxx);
      end
      A=[0.9817 -0.1501 -0.2322]';
      G=BB(1:k);
      pp=G*A;
      pre_varRX(n)=pp;
end
soundsc(out,fs,bits)
Dsys_error=x-out;
Dsys_snr_dB=20*log10(norm(x)/norm(Dsys_error))
Rv11 = corrcoef(x,out)
figure
subplot(2,1,1)
plot(Ns,pre_varTX,'k');grid;xlabel('Encode prediction value sequence
...using a 3 oreder predictor');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(Ns,pre_varRX,'k');grid;xlabel('Decode prediction value sequence
...using a 3 oreder predictor');ylabel('Amplitude')
figure
subplot(2,1,1)
plot(Ns,x,'k');grid;xlabel('Input sequence');ylabel('Amplitude')
subplot(2,1,2)
plot(Ns,out,'k');grid;xlabel('Reconstructed sequence using a 3 order
...predictor');ylabel('Amplitude')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม uniform_Q

```
function [dn,inner]=uniformQ(e,LEVEL)
      d=2/LEVEL;
      u=d.*[0:LEVEL-1];
      q=u-((LEVEL-1)/2)*d;
      if e >= 0
            inner=max(find((q-d/2 <= e)&(e <=q+d/2)));
      end
      if e >= q(length(q))+d/2
            inner = length(q);
      end
      if e <= 0
            inner=min(find((e <=q+d/2)));
      if e <= q(1)-d/2
            inner = 1;
      end
end
dn=q(inner);
```

โปรแกรม Inuniform_Q

```
function [dn]=Inuniform_Q(inner,LEVEL)
      d=2/LEVEL;
      u=d.*[0:LEVEL-1];
      q=u-((LEVEL-1)/2)*d;
      dn=q(inner);
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถลุล่วงได้ด้วยความกรุณา ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และเป็นแรงบันดาลใจจาก ผศ.อัครพล ตรีรัตน์ และอาจารย์ศรวัฒน์ ชิวปรีชา อันเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำปริญญานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับน้ำใจช่วยเหลือ ติชมผลงานให้ลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่น้อง ที่สนับสนุน การเงิน ความรัก และกำลังใจให้เราฟันฝ่ามาจนถึงจุดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์ "วิศวกรรมการสื่อสาร," อักษรสยามการพิมพ์ 27 สิงหาคม 2544

[2] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky ,"Signals and System," Prentice-Hall, 1997

[3] Khalid Sayood, "Introduction Data Compression," Morgan Kaufmann, 1996

[4] A.M. Kondoz, "Digital Speech Coding for Low Bit Rate Communication Systems," John Wiley & Sons, 1994

[5] N.S.Jayant, "Digital coding Of waveforms," Prentice-Hall, 1984

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้