



ประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ  
สำหรับสัญญาณเสียง

PERFORMANCE OF UNIFORM QUANTIZATION AND NON-UNIFORM  
QUANTIZATION PROCESSES OF VOICE SIGNAL



นางสาวมาลี ศรีระวัตร รหัส 52362137

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 12 ก.ย. 2556
เลขทะเบียน..... 1637.6.2.93
เลขเรียกหนังสือ..... ๙๕.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๒๕๖๖

๒๕๕๕

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2555



## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ      ประสิทธิภาพของกระบวนการควอนตัมแบบสม่ำเสมอและแบบไม่  
สม่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง

ผู้ดำเนินโครงการ      นางสาวมาลี ศรีระวัตร รหัส 52362137


ที่ปรึกษาโครงการ      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา

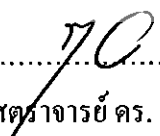
สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า

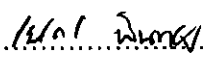
ภาควิชา                      วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา                2555

.....  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาดไทย อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)

  
.....กรรมการ  
(ดร. ชัยรัตน์ พินทอง)

ชื่อหัวข้อโครงการ      ประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และแบบไม่  
สม่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง

ผู้ดำเนินโครงการ      นางสาวมาตี ศรีระวัตร รหัส 52362137

ที่ปรึกษาโครงการ      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา

สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา                      วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา                2555

.....

### บทคัดย่อ

สัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณที่ถูกรบกวนได้ง่าย การแก้ไขสัญญาณอนาลอกกลับคืนมามีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นการส่งสัญญาณอนาลอกมักแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนการส่งผ่านช่องสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณดิจิทัลง่ายต่อการแก้ไขบิดผิดพลาดและบีบอัดได้ การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การสุ่มตัวอย่าง การควอนไทซ์ และการเข้ารหัส

การควอนไทซ์เป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้สัญญาณอนาลอกไม่ต่อเนื่องทางขนาด การควอนไทซ์ที่ไม่เหมาะสมสร้างสัญญาณรบกวนขึ้นได้ สัญญาณที่ถอดกลับคืนมาจึงผิดเพี้ยนไปจากเดิม เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์ 2 กรณีคือ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ โครงการฉบับนี้จึงเขียนโปรแกรม MATLAB กำหนดค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในการควอนไทซ์ (Signal-to-Quantization Noise Ratio: SQNR) ของสัญญาณเสียง

การเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่า SQNR ของสัญญาณเสียง โดยสร้างส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับป้อนจำนวนบิตต่อแซมเปิล ค่าสัมประสิทธิ์  $\mu$  และแสดงผลค่า SQNR ผลคือ ค่า SQNR ที่คำนวณได้จากโปรแกรมให้ผลตรงตามทฤษฎี

**Project title** Performance of Uniform and Non-uniform Quantization Processes for Voice Signal

**Name** Ms. Malee Srirawatr ID 52362137

**Project advisor** Asst. Prof. Dr. Surachet Kanprachar

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic year** 2012

---

### Abstract

An analog is agitated easily. The recovered output analog signal operates difficult and complexly, hence most of analog signal convert into digital signal before transmission through bandlimited channels. The advantage of digital signal is bit error correction and compression. An analog-to-digital conversion consists of 3 basic operations that are sampling, quantizing and encoding.

The quantizing is significant operation that generates a discrete in amplitude. The incorrect quantizing generates a noise, therefore, recovered analog signal cause a distortion. Hence, performance of quantization by 2 types that are uniform and non-uniform quantization. This project makes programming in MATLAB for calculates a signal-to-quantization noise ratio (SQNR) for voice signal.

In order to calculate the SQNR value by generates graphic user interface (GUI) for key a number of bit per sample,  $\mu$  coefficient and show the SQNR value. As a result, the SQNR value from programming be in line with theorem.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนิสวกรรมเรื่อง ประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไตซ์แบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จาก

ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเชษฐ์ กานต์ประชา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนให้ความรู้ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ต่อโครงการนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี จนกระทั่งโครงการเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัครพันธ์ วงศ์กัณฑ์ และ ดร. ชัยรัตน์ พินทอง คณะกรรมการโครงการมา ณ โอกาสนี้



นางสาวมาลี ศรีระวัตร

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท..... ก	
บทคัดย่อภาษาไทย..... ข	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ค	
กิตติกรรมประกาศ..... ง	
สารบัญ..... จ	
สารบัญตาราง..... ข	
สารบัญรูป..... ข	
บทที่ 1 บทนำ..... 1	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ..... 1	
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... 2	
1.3 ขอบเขตของโครงการ..... 2	
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน..... 2	
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ..... 3	
1.6 งบประมาณ..... 3	
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 4	
2.1 ทฤษฎีการสูมตัวอย่าง..... 4	
2.2 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด..... 5	
2.2.1 การสูมตัวอย่างแบบธรรมชาติ..... 5	
2.2.2 การสูมตัวอย่างแบบชั่วขณะ..... 7	
2.3 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์..... 9	
2.3.1 ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณ PCM..... 9	
2.3.2 ควอนไทเซชันนอยส์..... 11	
2.3.3 กำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวน..... 12	
2.3.4 กำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน..... 13	
2.3.5 คอมแพนดิง..... 14	
2.3.6 การควอนไทซ์และการเข้ารหัสสัญญาณในกรณีที่มีการทำคอมแพนดิง..... 16	

## สารบัญ (ต่อ)

2.3.7 SQNR ในกรณีการควอนไทซ์แบบ $\mu$ -law และ $A$ -law.....	20
2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	20
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินโครงการ.....	<b>22</b>
3.1 การศึกษาหลักการและทฤษฎี.....	22
3.1.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.1.2 โปรแกรม MATLAB.....	22
3.1.3 โปรแกรม Cool Edit Pro.....	22
3.2 การประยุกต์หลักการและทฤษฎีสำหรับการเขียนโปรแกรม.....	23
3.2.1 การบันทึกสัญญาณเสียง.....	23
3.2.2 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	23
3.3 การวิเคราะห์และสรุปผล.....	24
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดลอง.....	<b>25</b>
4.1 อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการควอน- ไทซ์.....	25
4.2 อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน.....	28
<b>บทที่ 5</b> สรุป.....	<b>30</b>
เอกสารอ้างอิง.....	31
ภาคผนวก ก การพิสูจน์หาค่า SQNR ของสัญญาณที่มีการกระจายตัวทางสถิติแบบเกาส์เซียน.....	32
ภาคผนวก ข คู่มือการใช้งาน โปรแกรมคำนวณค่า SQNR.....	44
ภาคผนวก ค โค้ดสำหรับโปรแกรม MATLAB.....	51
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบค่า SQNR จากโปรแกรม.....	61
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเข้ารหัสและถอดรหัสของระบบ PCM แบบ $\mu$ -law ( $\mu = 255$ ).....	18
2.2 ตารางการเข้ารหัสและถอดรหัสของระบบ PCM แบบ $A$ -law.....	19





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ.....	6
2.2 สเปกตรัมของสัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ.....	7
2.3 สัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ.....	8
2.4 สเปกตรัมของสัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ.....	9
2.5 การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ.....	10
2.6 การเกิดควอนไทเซชันนอยส์กรณีของการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ.....	12
2.7 การแทรกซ้นตอนของการอัดสัญญาณและการบีบสัญญาณลงในระบบ PCM.....	14
2.8 ลักษณะของการอัดสัญญาณแบบ $\mu$ -law.....	15
2.9 การประมาณค่า 4 เซกเมนต์แรกในกรณีของ $\mu$ -law มีค่า $\mu = 255$ .....	17
3.1 กราฟิกส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของ โปรแกรม Cool Edit Pro.....	23
4.1 SQNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที.....	25
4.2 SQNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที.....	26
4.3 SQNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที.....	27
4.4 SNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที.....	28
4.5 SNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที.....	29

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การสื่อสารเป็นกระบวนการสำคัญของมนุษย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สัญญาณที่ใช้ในระบบสื่อสารมี 2 ประเภทคือ สัญญาณอนาลอกและสัญญาณดิจิทัล สัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่อง จึงถูกรบกวนได้ง่าย สัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นคุณสมบัติของสัญญาณดิจิทัลที่เหนือกว่าสัญญาณอนาลอกคือ เมื่อสัญญาณดิจิทัลถูกรบกวนให้มีรูปร่างผิดเพี้ยน ปลายทางสามารถตีความและแยกสัญญาณเดิมออกมาได้ นอกจากนี้สัญญาณดิจิทัลยังจัดเก็บได้ง่าย และมีความแม่นยำ ทำให้มีความน่าเชื่อถือ ในระบบสื่อสารจึงนิยมแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Conversion: A/D) วิธีที่นิยมใช้คือ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ (Pulse Code Modulation: PCM) มี 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย การสุ่มตัวอย่าง (Sampling), การควอนไทซ์ (Quantizing) และการเข้ารหัส (Encoding) ในกระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการควอนไทซ์ (Quantization Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้สัญญาณอนาลอกไม่ต่อเนื่องในทางขนาด ดังนั้นสัญญาณรบกวนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนควอนไทเซชันเลเวล (number of quantization levels) และการออกแบบระยะห่างระหว่างควอนไทเซชันเลเวล

โครงการนี้ได้จัดทำเพื่อศึกษาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการควอนไทซ์ โดยใช้สัญญาณเสียงพูดเป็นกรณีศึกษา พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาคือจำนวนบิตต่อแซมเปิล (number of bits per sample) แต่สัญญาณเสียงเป็นสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงพิจารณา 2 กรณี คือ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Quantization) และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Quantization:  $\mu$ -law Quantization) การวิเคราะห์ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีจะถูกแสดงและเปรียบเทียบในรูปแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณข่าวสารต่อกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในการควอนไทซ์ (Signal-to-Quantization Noise Ratio: SQNR)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล
2. เพื่อศึกษาการทำ  $\mu$ -law Quantization ของสัญญาณเสียงพูด
3. เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

เขียนโปรแกรม MATLAB ประมวลผลสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไทซ์ เนื่องจากการเปลี่ยนจำนวนบิตต่อแซมเปิล กรณีการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Quantization) และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Quantization:  $\mu$ -law Quantization) โดยวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลในรูปแบบ SQNR

## 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	ปี 2555							ปี 2556			
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษา Pulse code modulation											
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB											
3. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของสัญญาณรบกวน											
4. ทดสอบการทำงานและปรับปรุงการเขียนโปรแกรม											
5. สรุปผลและจัดทำรูปเล่มปฏิญานิพนธ์											

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. โครงการสามารถนำไปประกอบการวิเคราะห์และการออกแบบระบบสื่อสารให้มีประสิทธิภาพ
2. โครงการสามารถใช้อธิบายคุณลักษณะของ  $\mu$ -law Companding ได้
3. โครงการเป็นประโยชน์กับผู้สนใจศึกษา ช่วยให้เข้าใจเรื่องสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไทซ์

### 1.6 งบประมาณ

ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มปริญญานิพนธ์  
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น(หนึ่งพันบาทถ้วน)

1,000 บาท



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสื่อสาร โดยการส่งสัญญาณและรับสัญญาณในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล เรียกว่า การสื่อสารดิจิทัล (Digital communication) การสื่อสารดิจิทัลนี้มีข้อได้เปรียบ เช่น การบีบอัดข้อมูล ซึ่งทำให้สามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการแก้ไขบิดผิดผลาดที่สามารถทำได้ง่ายกว่าการแก้ไขสัญญาณผิดผลาดในแบบอนาลอก วิธีการมอดูเลตที่นิยม คือ การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ (Pulse Code Modulation: PCM) มี 3 ขั้นตอนคือ การสุ่มตัวอย่าง (Sampling) การควอนไทซ์ (Quantizing) และการเข้ารหัส (Encoding)

#### 2.1 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Theorem)

ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างเป็นทฤษฎีที่มีประโยชน์มาก เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารแบบดิจิทัล

ทฤษฎี รูปแบบของคลื่นทางกายภาพอาจจะแสดงผ่านช่วงเวลา  $-\infty < t < \infty$  โดย

$$w(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \frac{\sin\{\pi f_s [t - (n/f_s)]\}}{\pi f_s [t - (n/f_s)]} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$a_n = f_s \int_{-\infty}^{\infty} w(t) \frac{\sin\{\pi f_s [t - (n/f_s)]\}}{\pi f_s [t - (n/f_s)]} dt \quad (2.2)$$

ถ้า  $w(t)$  คือ สัญญาณอนาลอกที่มีความถี่  $B$  เฮิรตซ์ และ  $f_s \geq 2B$  ดังนั้น

$$a_n = w(n/f_s) \quad (2.3)$$

เมื่อสัญญาณถูกสุ่มตัวอย่างทุกๆ  $1/f_s$  วินาที อัตราการสุ่มตัวอย่างน้อยที่สุด (minimum sampling rate) มีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ของสัญญาณอนาลอก

$$(f_s)_{\min} = 2B \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.4) นี้เรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist frequency)

ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างของไนควิสต์ (Nyquist's sampling theorem) ได้เสนอทฤษฎีบทว่า ถ้า สัญญาณอนาลอกที่มีความถี่สูงสุดจำกัดที่ค่าหนึ่งจะสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีข่าวสารอยู่อย่าง ครบถ้วน โดยการสุ่มตัวอย่างสัญญาณอนาลอกนั้นด้วยอัตราสุ่มที่เหมาะสม จึงจะสามารถสร้าง สัญญาณอนาลอกกลับมาใหม่ได้ โดยการจัดการกับสัญญาณพัลส์อย่างเหมาะสม

## 2.2 การมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด (Pulse Amplitude Modulation: PAM)

การสุ่มตัวอย่างเป็นขั้นตอนแรกในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งทำ ให้สัญญาณอนาลอกไม่ต่อเนื่องในทางเวลา แต่ยังคงต่อเนื่องในทางขนาด สัญญาณที่ได้จาก กระบวนการนี้เรียกว่า สัญญาณการมอดูเลตพัลส์เชิงแอมพลิจูด (Pulse Amplitude Modulation: PAM)

การสุ่มตัวอย่างของสัญญาณ PAM แบ่งเป็น 2 กรณีคือ

- 1) การสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ (Natural Sampling or Gating)
- 2) การสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ (Instantaneous Sampling or Flat-Top PAM)

### 2.2.1 การสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ (Natural Sampling or Gating)

นิยาม ถ้า  $w(t)$  คือ สัญญาณอนาลอกที่มีความถี่  $B$  เฮิรตซ์ สัญญาณ PAM จากการสุ่ม ตัวอย่างแบบธรรมชาติ คือ

$$w_s(t) = w(t)s(t) \quad (2.5)$$

โดยที่

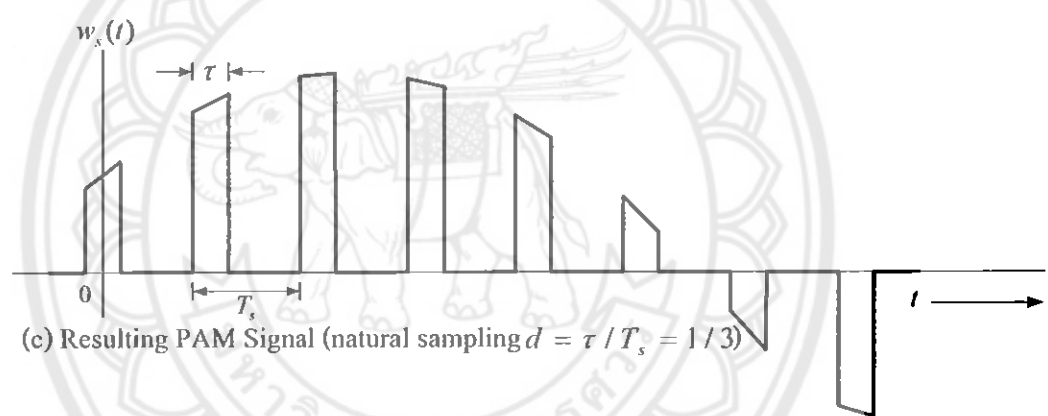
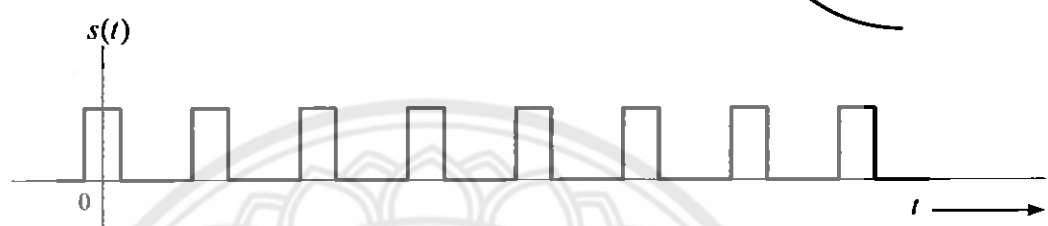
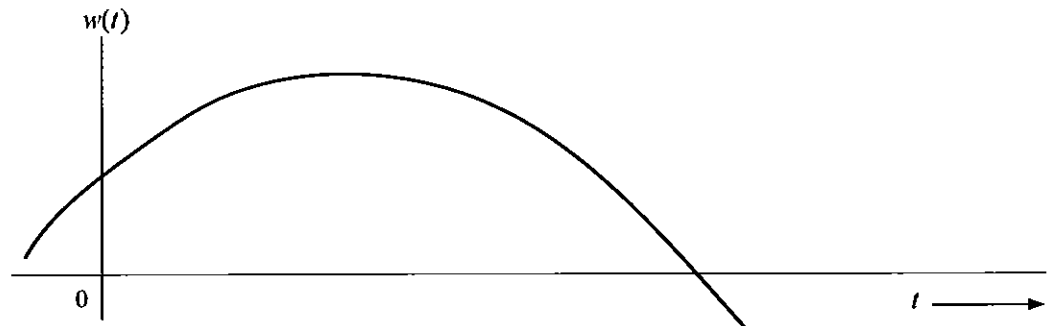
$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Pi\left(\frac{t - kT_s}{\tau}\right) \quad (2.6)$$

คือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและ  $f_s = 1/T_s \geq 2B$

ทฤษฎี สเปกตรัมของสัญญาณ PAM จากการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ

$$W_s(f) = [w_s(t)] = d \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi n d}{\pi n d} W(f - n f_s) \quad (2.7)$$

โดยที่  $f_s = 1/T_s$ ,  $\omega_s = 2\pi f_s$ , Duty Cycle ของ  $s(t)$  คือ  $d = \tau/T_s$

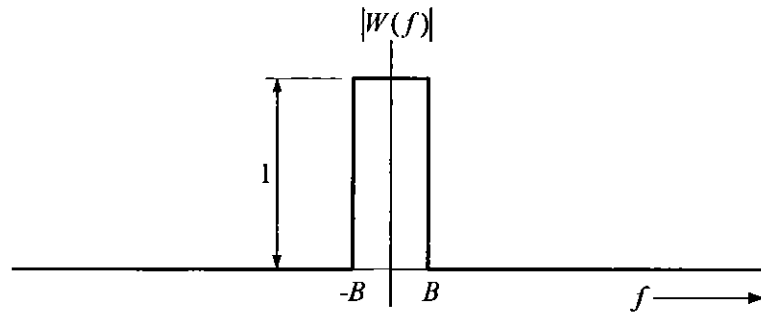


PAM signal with natural sampling.

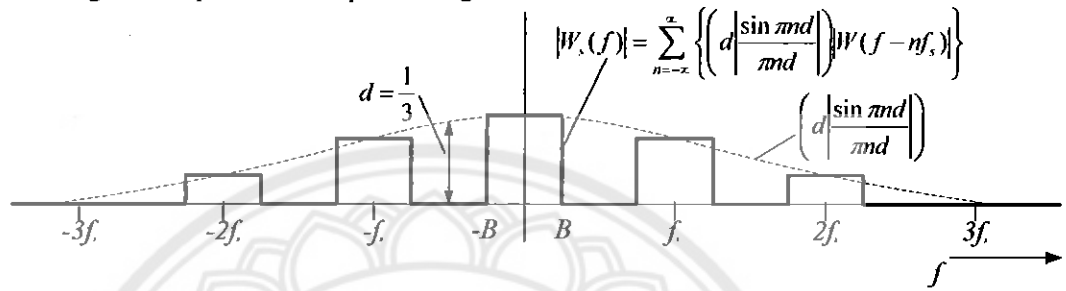
รูปที่ 2.1 สัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ  
ที่มา: Leon W.Couch, II

สัญญาณ PAM รูปที่ 2.1 คือสัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ เกิดจากการคูณกันระหว่างสัญญาณอนาลอกและพัลส์ที่มีรูปร่างตามสมการที่ (2.6) โดยสัญญาณ PAM ที่ได้จะมีความถี่เท่ากับความถี่ของพัลส์ที่นำมาคูณกับสัญญาณอนาลอก

การสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ ในทางเวลาสัญญาณ PAM จะมีแอมพลิจูดของแต่ละพัลส์เหมือนกับสัญญาณอนาลอกขณะเวลาที่สุ่มตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.1 ส่วนสเปกตรัมของเป็นไปตามสมการที่ (2.7) ขนาดของสเปกตรัมที่ได้จะคงที่ตลอดความถี่ที่ทำการสุ่ม ดังรูปที่ 2.2



(a) Magnitude Spectrum of Input Analog Waveform



(b) Magnitude Spectrum of PAM (natural sampling) with  $d = 1/3$  and  $f_s = 4B$   
Spectrum of a PAM waveform with natural sampling.

รูปที่ 2.2 สเปกตรัมของสัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบธรรมชาติ

ที่มา: Leon W.Couch, II

### 2.2.2 การสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ (Instantaneous Sampling or Flat-Top PAM)

นิยาม ถ้า  $w(t)$  คือสัญญาณอนาล็อกที่มีความถี่  $B$  เฮิรตซ์ สัญญาณ PAM จากการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ คือ

$$w_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} w(kT_s)h(t - kT_s) \tag{2.8}$$

โดยที่

$$h(t) = \Pi\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & |t| < \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases} \tag{2.9}$$

โดยที่

$$\tau \leq T_s = 1/f_s \text{ และ } f_s \geq 2B$$

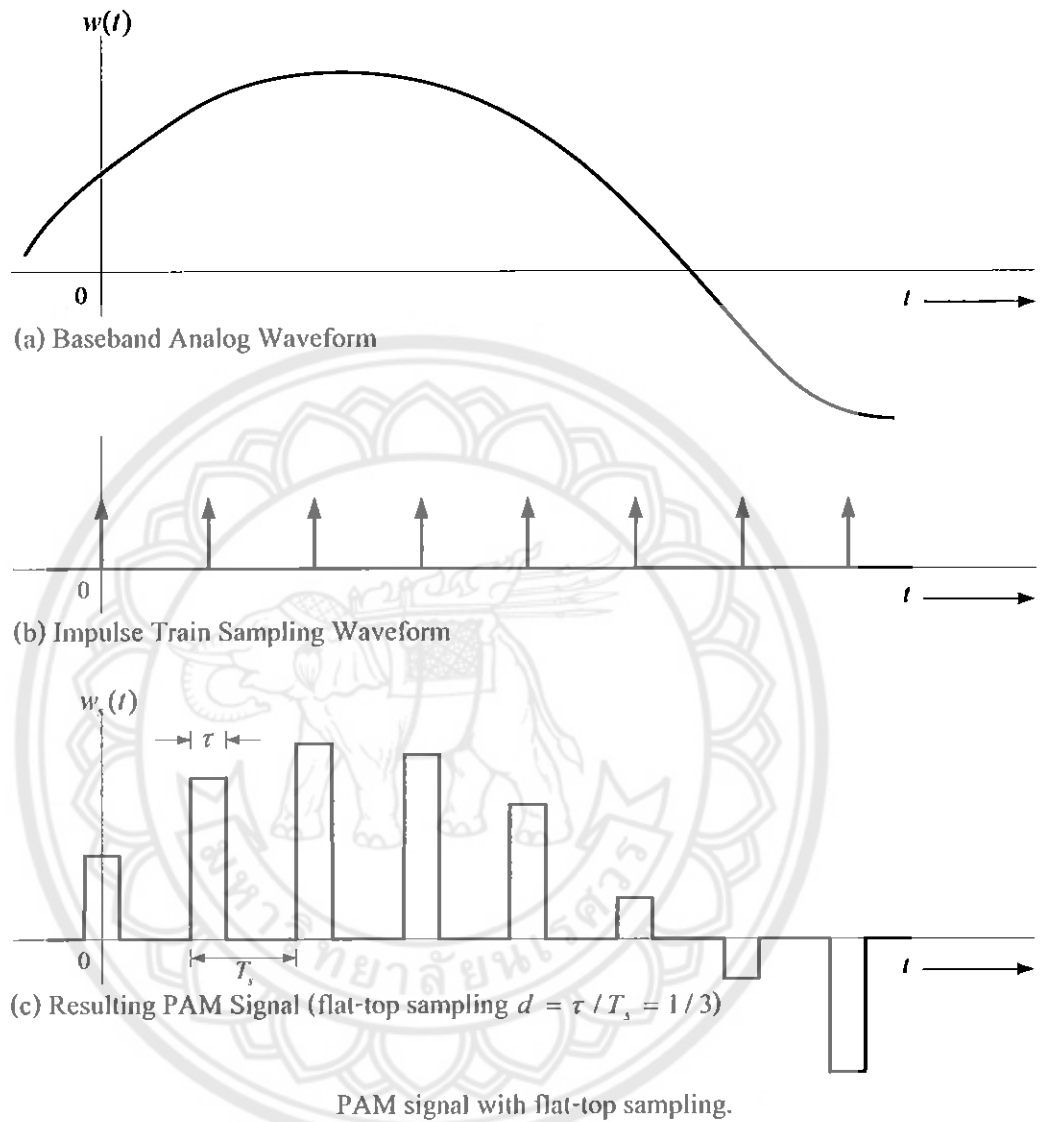
ทฤษฎี สเปกตรัมสำหรับ flat-top PAM คือ

$$W_s(f) = \frac{1}{T_s} H(f) \sum_{n=-\infty}^{\infty} W(f - kf_s) \tag{2.10}$$

โดยที่



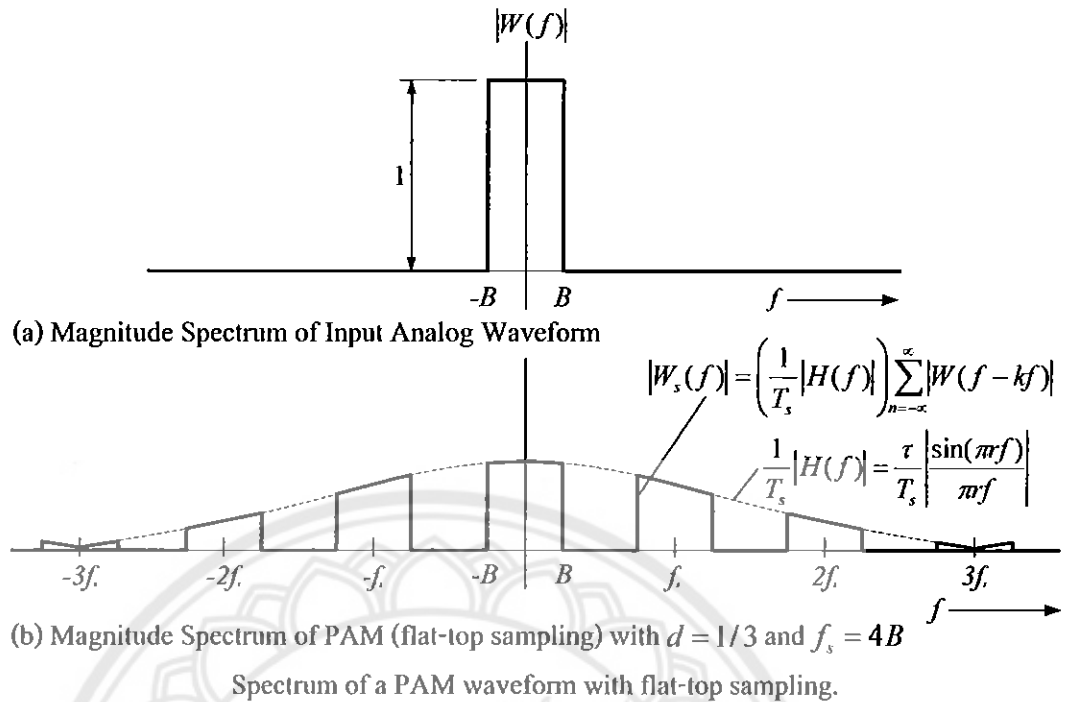
$$H(f) = F[h(t)] = \tau \left( \frac{\sin \pi f \tau}{\pi f \tau} \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.3 สัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ

ที่มา: Leon W.Couch, II

สัญญาณ PAM รูปที่ 2.3 คือ สัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ ซึ่งเกิดจากสัญญาณอนาล็อกคูณกับพัลส์ที่มีรูปร่างตามสมการที่ (2.9) ในทางเวลาสัญญาณ PAM กรณีสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะจะมีแอมพลิจูดของแต่ละพัลส์คงที่ระหว่างเวลาที่ทำการสุ่มตัวอย่าง และในทางความถี่จะมีขนาดของสเปกตรัมเป็นไปตามสมการ  $\frac{1}{T_s} |H(f)|$  ตลอดความถี่ที่ทำการสุ่ม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของสัญญาณ PAM กรณีการสุ่มตัวอย่างแบบช่วงขณะ

ที่มา: Leon W.Couch, II

## 2.3 การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ (Pulse Code Modulation)

การมอดูเลตแบบรหัสพัลส์ หรือ PCM เป็นระบบสื่อสารแบบดิจิทัลที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้ในระบบการสื่อสาร PCM เป็นกระบวนการที่ใช้ประโยชน์จากทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง โดยจัดการกับสัญญาณ PAM ให้เหมาะกับการส่งผ่านระบบมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณ PAM เมื่อส่งผ่านระบบจะประสบปัญหาการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งทำให้สเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ที่ปลายทางผิดเพี้ยนไปจากเดิม เมื่อทำการตีมอดูเลตด้วยตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ สัญญาณที่ได้จะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณเดิม สัญญาณ PCM คือ การจัดการกับสัญญาณ PAM โดยการนำสัญญาณ PAM ไปผ่านการควอนไทซ์ และการเข้ารหัส (Encoding) เป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วจึงนำสัญญาณดิจิทัลที่ได้ส่งผ่านระบบต่อไป ซึ่งทางภาครับทำการถอดรหัส (Decoding) เป็นสัญญาณ PAM แล้วนำสัญญาณ PAM นั้น ไปตีมอดูเลตเป็นสัญญาณเบสแบนด์กลับคืนมา

### 2.3.1 ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณ PCM

สัญญาณ PCM สร้างจากสัญญาณ PAM ที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณจริง จึงทำให้สัญญาณ PAM มีขนาดต่อเนื่องตามค่าที่สุ่มตัวอย่าง เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถแทนสัญญาณด้วยจำนวนบิตที่ไม่จำกัด สัญญาณ PAM จึงถูกปัดลงให้สามารถแทนระดับสัญญาณได้ ขั้นตอนในการจัดระดับทำให้สัญญาณอนาล็อกไม่ต่อเนื่องในทางขนาด เรียกว่า การควอนไทซ์ (Quantization)

ซึ่งช่วงของขนาดสัญญาณที่เป็นไปได้จะถูกแบ่งให้มีจำนวนระดับสัญญาณที่จำกัดเรียกว่า ระดับของการควอนไทซ์ (Quantization levels)

$$x_i = \begin{cases} \min\{X\} & ; \quad i=0 \\ \frac{\tilde{x}_i + \tilde{x}_{i+1}}{2} & ; \quad i=1, 2, \dots, M-1 \\ \max\{X\} & ; \quad i=M \end{cases} \quad (2.12)$$

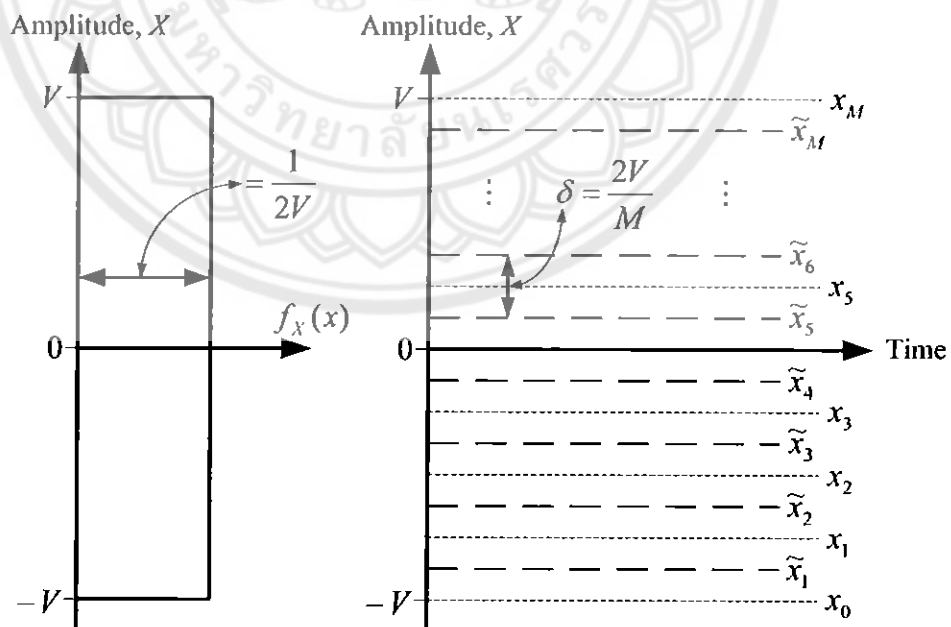
โดยที่  $M$  คือ จำนวนระดับของการควอนไทซ์ (number of quantization levels)

$\tilde{x}_i$  คือ ระดับของการควอนไทซ์ที่  $i$  ( $i^{\text{th}}$  Quantization levels) จะได้  $M$  ระดับ  $\{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_M\}$

$x_i$  คือ ระดับขอบเขต (boundary level) จะได้  $M+1$  ระดับ

การควอนไทซ์มี 2 กรณีคือ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Quantization) และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Quantization) การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอจะมีระยะห่างระหว่างระดับของการควอนไทซ์เท่ากัน ดังรูปที่ 2.5 จะได้ค่าคงที่ เรียกว่า สเต็ปไซส์ (step size,  $\delta$ )

$$\text{Step size: } \delta = \frac{2V}{M} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.5 การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ

ที่มา: Asst.Prof.Dr.Surachet Kanprachar (2554)

จำนวนระดับของการควอนไทซ์ เมื่อใช้สัญญาณดิจิทัลแบบไบนารีซึ่ง “0” กับ “1” จะ  
ได้จำนวนบิตดังนี้

$$n = \lceil \log_2 \{M\} \rceil \quad (2.14)$$

$$R_b = nf_s \quad (2.15)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนบิตต่อแซมเปิล (number of bits per sample)

$R_b$  คือ จำนวนบิตต่อหนึ่งหน่วยเวลา (bit rate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bits per second: bps)

ในกรณีที่จำนวนระดับของการควอนไทซ์ไม่เป็นจำนวนลงตัว ต้องปัดค่าขึ้นให้จำนวน  
บิตต่อแซมเปิลเป็นจำนวนลงตัว เช่น ถ้า  $M = 200$  เมื่อคำนวณจะได้จำนวนบิตต่อแซมเปิล  
ประมาณ 7.6 ต้องทำการปัดขึ้นเป็น 8 บิต ในการควอนไทซ์ที่มี 200 ระดับ การใช้จำนวนบิตตาม  
ตัวอย่างที่กล่าวมานี้ นับว่าเป็นการใช้บิตข้อมูลที่ไม่มีประสิทธิภาพ ฉะนั้นโดยทั่วไปมักจะแบ่ง  
จำนวนระดับของการควอนไทซ์ให้เหมาะสมกับจำนวนบิตที่จะใช้ในการเข้ารหัส เช่น สัญญาณ  
ไบนารี 8 บิต จะทำการควอนไทซ์เป็น 256 ระดับ เป็นต้น สัญญาณ PAM ที่ถูกควอนไทซ์เรียบร้อยแล้ว  
แล้วจะถูกนำไปเข้ารหัสเป็นสัญญาณ PCM ออกมา

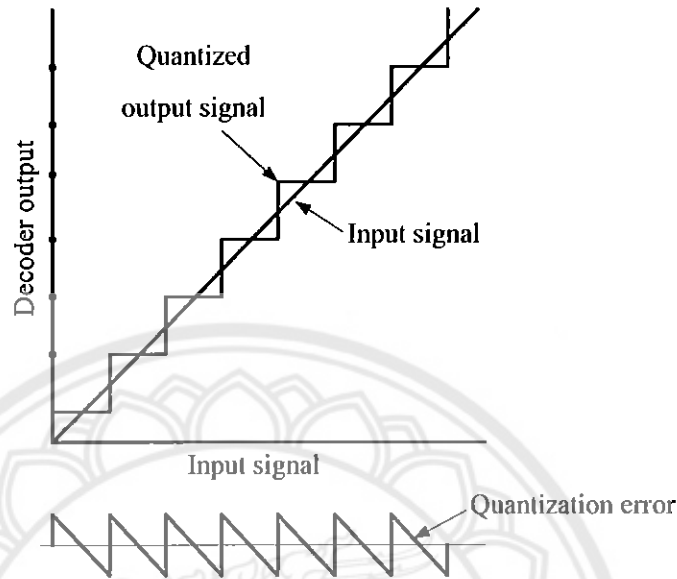
เนื่องจากการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอมีข้อเสียคือ เมื่อสัญญาณมีการกระจายทางสถิติ  
ไม่สม่ำเสมอแล้วทำการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจำนวนมาก ดังนั้น  
จึงไม่นิยมใช้ในระบบสื่อสาร ส่วนวิธีที่ใช้คือ การนำสัญญาณมาอัดให้สัญญาณนั้นมีการกระจาย  
ทางสถิติสม่ำเสมอมากที่สุด จึงนำไปผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ วิธีนี้เรียกว่า การควอนไทซ์  
แบบไม่สม่ำเสมอ

### 2.3.2 ควอนไทเซชันนอยส์ (Quantization Noise)

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไทซ์ เรียกว่า ควอนไทเซชันนอยส์  
(Quantization Noise) โดยจะพิจารณากรณีการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ โดยระยะห่างระหว่าง  
ระดับของการควอนไทซ์เป็น  $\delta$  การวิเคราะห์หาควอนไทเซชันนอยส์จะใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ระดับสัญญาณที่ถอดรหัสได้จะแตกต่างจากระดับของสัญญาณจริงสูงสุดไม่เกิน  $\frac{\delta}{2}$
- 2) ระดับสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างมีการกระจายทางสถิติเท่ากัน นั่นคือ ฟังก์ชันความ  
หนาแน่นความน่าจะเป็นมีค่า  $\frac{1}{2\delta}$

3) ระดับสัญญาณสูงสุดจะต้องอยู่ในช่วงการทำการควอนไทซ์ ถ้าระดับสัญญาณสูงเกินกว่าค่าสูงสุดที่ทำการควอนไทซ์ ก็จะเกิดการผิดเพี้ยนเนื่องจากสาเหตุนี้ขึ้นอีก



รูปที่ 2.6 การเกิดควอนไทเซชันนอยส์กรณีของการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ  
ที่มา: บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์ (2541)

การเกิดควอนไทเซชันนอยส์กรณีของการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 2.6 เกิดจากความต่างระหว่างค่าสัญญาณจริง และค่าสัญญาณที่ผ่านการควอนไทซ์ ค่าความต่างของทั้ง 2 สัญญาณนี้คือ ควอนไทเซชันนอยส์

### 2.3.3 กำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวน

1) กำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางความน่าจะเป็น

$$P_{\text{signal}} = E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_X(x) dx \quad (2.16)$$

โดยที่  $f_X(x)$  คือ ความน่าจะเป็นของ  $X$

$$P_{\text{noise}} = \sum_{k=1}^M \overline{e_k^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\overline{e_k^2} = E[(X - \tilde{x}_k)^2] = \int_{x_{k-1}}^{x_k} (x - \tilde{x}_k)^2 f_X(x) dx$

โดยที่  $\overline{e_k^2}$  คือ กำลังของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยที่ระดับของการควอนไทซ์ที่  $k$

2) กำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางเวลา

$$P_{signal} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2[n] \quad (2.18)$$

$$P_{noise} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \tilde{x}_k[n])^2 \quad (2.19)$$

โดยที่  $N$  คือ จำนวนข้อมูลของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่าง  
 $x[n]$  คือ ข้อมูลของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างที่  $n$  เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots, N$

### 2.3.4 กำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR)

การหาค่า SNR จำเป็นต้องรู้กำลังของสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวน สมการ SNR เขียนได้ดังนี้

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (2.20)$$

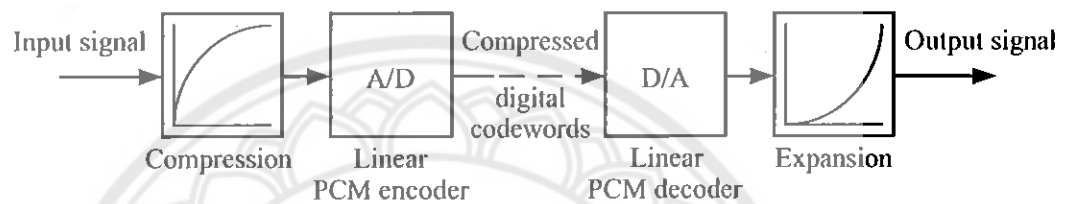
ดังนั้น กำลังของสัญญาณต่อกำลังของควอนไทเซชันนอยส์ (Signal to Quantization Noise Ratio: SQNR) คือ

$$SQNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{E[X^2]}{\sum_{k=1}^M e_k^2} \quad (2.21)$$

ระบบ PCM ที่มีการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอแม้จะทำได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียหลัก 2 ประการคือ มีโอกาสที่จะใช้จำนวนบิตในการเข้ารหัสอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งค่า SNR จะเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณ ข้อเสียดังกล่าวนี้จึงทำให้ระบบ PCM ที่มีการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอไม่นิยมนำมาใช้ในระบบโทรศัพท์ และวิธีการที่นำมาใช้คือ ระบบที่มีการทำคอมแพนดิง (Companding)

### 2.3.5 คอมแพนดิง (Companding)

คอมแพนดิง (Companding) มาจากคำภาษาอังกฤษสองคำมาผสมกัน คือ Compressing และ Expansion ซึ่งหมายถึงในภาคส่งนั้นก่อนที่จะทำการสุ่มตัวอย่างจะทำการอัดสัญญาณ และในภาครับนั้นหลังจากที่ถอดรหัสแล้วจะทำการยืดสัญญาณกลับคืนมา รูปที่ 2.7 แสดงการแทรกชั้นตอนดังกล่าวลงในระบบ PCM การทำคอมแพนดิงนำมาใช้ในระบบ PCM เพื่อแก้ปัญหาหลัก 2 ประการ คือ ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้จำนวนบิตในการเข้ารหัสสูงขึ้น และทำให้ค่า SNR ที่ระดับสัญญาณต่างๆ มีโอกาสที่จะมีค่าเท่าๆ กันมากขึ้น



รูปที่ 2.7 การแทรกชั้นตอนของการอัดสัญญาณและการยืดสัญญาณลงในระบบ PCM

ที่มา: บัณฑิต วิทยานานนท์ (2541)

วิธีการที่ใช้ในการทำคอมแพนดิงจะใช้ชิ้นส่วนหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการตอบสนองแบบไม่สม่ำเสมอ โดยภาคส่งจะมีความไม่สม่ำเสมอในลักษณะอัดสัญญาณที่มีระดับสูง ส่วนในภาครับจะทำการยืดสัญญาณนั้นกลับคืนมา ลักษณะสมบัติของความไม่สม่ำเสมอที่กำหนดเป็นมาตรฐานและใช้งานกันอยู่ทั่วไปในขณะนี้ มี 2 แบบคือ การควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law และการควอนไทซ์  $A$ -law

#### 1) การควอนไทซ์แบบ $\mu$ -law ( $\mu$ -law Quantization)

กรณีการควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law มีลักษณะของการอัดสัญญาณเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้

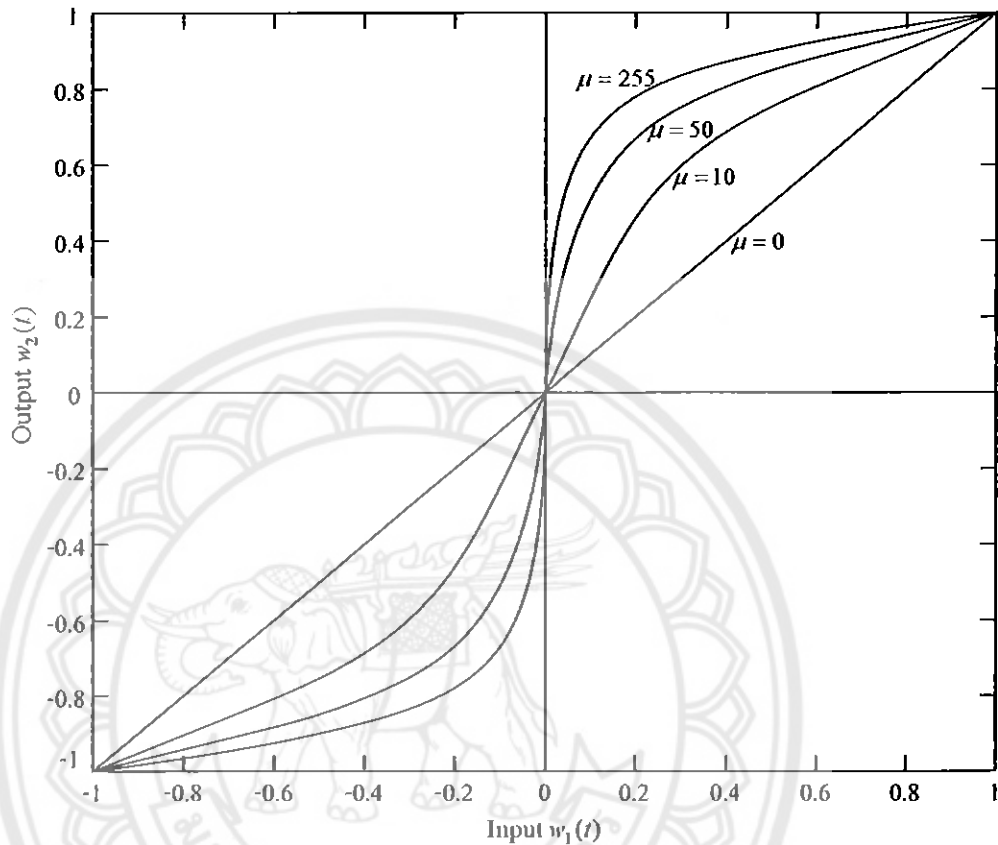
$$w_2(t) = \frac{\ln(1 + \mu|w_1(t)|)}{\ln(1 + \mu)} \operatorname{sgn}(w_1(t)) \quad (2.22)$$

โดยที่  $w_1(t)$  คือ สัญญาณก่อนทำการอัดสัญญาณ

$w_2(t)$  คือ สัญญาณหลังทำการอัดสัญญาณ

$$\operatorname{sgn}(w_1(t)) = \begin{cases} -1 & ; w_1(t) < 0 \\ 0 & ; w_1(t) = 0 \\ 1 & ; w_1(t) > 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

และ  $\mu$  คือพารามิเตอร์ที่บอกถึงความมากน้อยของการอัดสัญญาณ เมื่อทำการอัดสัญญาณตามสมการ (2.22) ลักษณะการอัดสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะของการอัดสัญญาณแบบ  $\mu$ -law

ที่มา: John G. Proakis, Masoud Salehi and Gerhard Bauch

การอัดสัญญาณตามสมการ (2.22) จะต้องบีบสัญญาณด้วยลักษณะที่สอดคล้องกัน ดังนั้นลักษณะของการบีบสัญญาณกรณีการควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law คือ

$$w_1(t) = \frac{(1 + \mu)^{|w_2(t)|}}{\mu} \text{sgn}(w_2(t)) \quad (2.24)$$

สำหรับการควอนไทซ์  $\mu$ -law นี้ ปัจจุบันใช้ในทวีปอเมริกาเหนือและประเทศญี่ปุ่นเป็นหลัก โดยที่ค่ามาตรฐาน  $\mu = 255$



## 2) การควอนไทซ์แบบ $A$ -law ( $A$ -law Quantization)

กรณีการควอนไทซ์แบบ  $A$ -law มีลักษณะของการอัดสัญญาณเขียนเป็นฟังก์ชันได้ดังนี้

$$w_2(t) = \begin{cases} \frac{A|w_1(t)|}{1 + \ln(A)} \operatorname{sgn}(w_1(t)) & ; 0 \leq |w_1(t)| < \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln|Aw_1(t)|}{1 + \ln(A)} \operatorname{sgn}(w_1(t)) & ; \frac{1}{A} < |w_1(t)| < 1 \end{cases} \quad (2.25)$$

โดยลักษณะของการบีบอัดสัญญาณกรณีการควอนไทซ์แบบ  $A$ -law คือ

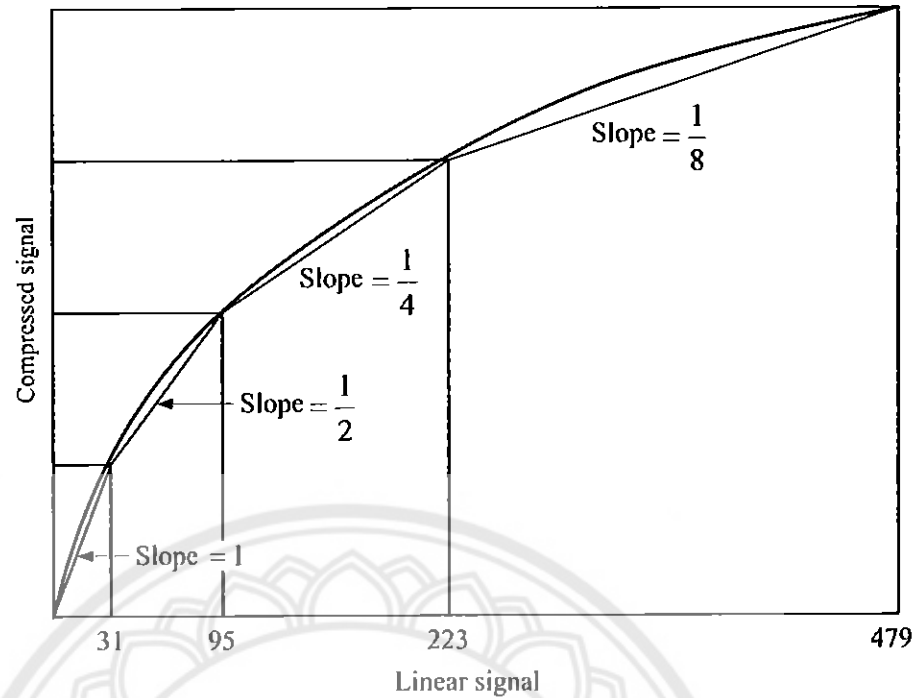
$$w_1(t) = \begin{cases} \frac{|w_2(t)|[1 + \ln(A)]}{A} \operatorname{sgn}(w_2(t)) & ; 0 < |w_2(t)| < \frac{1}{1 + \ln(A)} \\ \frac{e^{|w_2(t)|[1 + \ln(A)] - 1}}{A} \operatorname{sgn}(w_2(t)) & ; \frac{1}{1 + \ln(A)} < |w_2(t)| \leq 1 \end{cases} \quad (2.26)$$

สำหรับการควอนไทซ์แบบ  $A$ -law ใช้ในทวีปยุโรปและในประเทศไทย หลักการจะเหมือนกับ การควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law แต่จะแตกต่างกันในบางรายละเอียด

### 2.3.6 การควอนไทซ์และการเข้ารหัสสัญญาณในกรณีที่มีการทำคอมแพนดิง

การควอนไทซ์สัญญาณ PAM ในกรณีที่มีการอัดสัญญาณ เพื่อให้การเข้ารหัสลดความยุ่งยากลง จะทำการแบ่งระดับสัญญาณเป็นช่วงเรียกว่า เซกเมนต์ (segment) โดยในแต่ละเซกเมนต์สามารถประมาณเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบสม่ำเสมอได้ ซึ่งความชันของเส้นตรงในแต่ละเซกเมนต์จะไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.9 แสดงการประมาณค่าดังกล่าวนี้ของกรณีการควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law โดยค่าของ  $\mu = 255$  ในรูปแสดงเฉพาะ 4 เซกเมนต์ทางด้านบวกเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าความชันลดหลั่นลงตามลำดับของเซกเมนต์

การจัดแบ่งเซกเมนต์นั้น ในกรณี  $\mu$ -law และ  $A$ -law แบ่งเป็น 16 เซกเมนต์เหมือนกัน โดยที่ครึ่งหนึ่งอยู่ซีกบวกและอีกครึ่งหนึ่งอยู่ซีกลบ การควอนไทซ์ภายในแต่ละเซกเมนต์จะสามารถควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอได้



รูปที่ 2.9 การประมาณค่า 4 เซกเมนต์แรกในกรณีของ  $\mu$ -law มีค่า  $\mu = 255$   
ที่มา: บัณฑิต รัตนอารยานนท์ (2541)

เนื่องจากระบบ PCM ใช้การเข้ารหัสด้วยสัญญาณไบนารี 8 บิต แบ่งเซกเมนต์ออกเป็น 16 เซกเมนต์ ในแต่ละเซกเมนต์แบ่งย่อยออกเป็น 16 ระดับ เมื่อควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ ระยะห่างระหว่างระดับของการควอนไทซ์ภายในเซกเมนต์จะมีค่าเท่ากัน แต่ระยะห่างระหว่างระดับของการควอนไทซ์ของแต่ละเซกเมนต์มีขนาดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าสเต็ปไซส์ของเซกเมนต์นั้นๆ สัญญาณไบนารี 8 บิต ใช้บิตแรกแสดงตำแหน่งของเซกเมนต์ว่าอยู่ในซีกบวกหรือซีกลบ ใช้ 3 บิตถัดมาแสดงลำดับของเซกเมนต์ในซีกนั้น และใช้ 4 บิตสุดท้ายแสดงระดับภายในแต่ละเซกเมนต์ เมื่อใช้หลักเกณฑ์ตามที่กล่าวมานี้ ในกรณีการควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law การเข้ารหัสและการถอดรหัสแสดงในตารางที่ 2.1 กรณี  $\mu$ -law ระดับสัญญาณอนาล็อกซึ่งอยู่ในช่วง 0-1 จะถูกเข้ารหัสเป็น "00000000" และถ้าอยู่ซีกลบจะถูกเข้ารหัสเป็น "10000000" ระดับของการควอนไทซ์ในแต่ละเซกเมนต์จะเป็นตามที่แสดงไว้ในตาราง เมื่อรวมจำนวนระดับของสัญญาณที่จะควอนไทซ์และเข้ารหัสมีถึง 8159 ระดับในซีกบวกซีกเดียว

ตารางที่ 2.1 การเข้ารหัสและถอดรหัสของระบบ PCM แบบ  $\mu$ -law ( $\mu = 255$ )

Input Amplitude range	Step Size	Segment Code S	Quantization Code Q	Code Value	Decoder Amplitude
0-1	1		0000	0	0
1-3	2	000	0001	1	2
3-5			0010	2	4
⋮			⋮	⋮	⋮
29-31			1111	15	30
31-35	4	001	0000	16	33
⋮			⋮	⋮	⋮
91-95			1111	31	93
95-103	8	010	0000	32	99
⋮			⋮	⋮	⋮
215-223			1111	47	219
223-239	16	011	0000	48	231
⋮			⋮	⋮	⋮
463-479			1111	63	471
479-511	32	100	0000	64	495
⋮			⋮	⋮	⋮
959-991			1111	79	975
991-1055	64	101	0000	80	1023
⋮			⋮	⋮	⋮
1951-2015			1111	95	1983
2015-2143	128	110	0000	96	2079
⋮			⋮	⋮	⋮
3935-4063			1111	111	3999
4063-4319	256	111	0000	112	4191
⋮			⋮	⋮	⋮
7903-8159			1111	127	8031

ที่มา: บัณฑิต วิทยาลัยนอร์ท (2541)

ตารางที่ 2.2 ตารางการเข้ารหัสและถอดรหัสของระบบ PCM แบบ A-law

Input Amplitude range	Step Size	Segment Code S	Quantization Code Q	Code Value	Decoder Amplitude	
0-2	2	000	0000	0	1	
2-4			0001	1	3	
⋮			⋮	⋮	⋮	
30-32			1111	15	31	
32-34			0000	16	33	
⋮			⋮	⋮	⋮	
62-64	4	001	1111	31	63	
64-68		010	0000	32	66	
⋮			⋮	⋮	⋮	
124-128			1111	47	126	
128-136			011	0000	48	132
⋮				⋮	⋮	⋮
248-256	1111			63	252	
256-272	100	0000		64	264	
⋮		⋮		⋮	⋮	
496-512		1111		79	504	
512-544		101	0000	80	528	
⋮			⋮	⋮	⋮	
992-1024			1111	95	1008	
1024-1088	110		0000	96	1056	
⋮			⋮	⋮	⋮	
1984-2048			1111	111	2016	
2048-2176		111	0000	112	2112	
⋮			⋮	⋮	⋮	
3968-4096			1111	127	4032	

ที่มา: บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์ (2541)

สำหรับ  $A$ -law นั้น จะมีการเข้ารหัสตามตารางที่ 2.2 ข้อสังเกตของ  $A$ -law คือ จะมีระยะห่างระหว่างระดับของการควอนไทซ์ในเซกเมนต์ที่ 1 และ 2 เท่ากัน คือเท่ากับ 2 สำหรับจำนวนระดับที่แบ่งในแต่ละซีกจะเป็น 4096 ระดับ ซึ่งน้อยกว่าจำนวนระดับในกรณีของ  $\mu$ -law

### 2.3.7 SQNR ในกรณีการควอนไทซ์แบบ $\mu$ -law และ $A$ -law

เนื่องจากการควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law และ  $A$ -law มีค่าสเกลไปไซส์ในแต่ละเซกเมนต์ไม่เท่ากัน จึงทำให้ควอนไทเซชันนอยส์ในแต่ละเซกเมนต์ไม่เท่ากันด้วย โดยเซกเมนต์ที่มีการอัดสัญญาณสูงจะมีควอนไทเซชันนอยส์สูง แต่เนื่องจากระดับสัญญาณที่บริเวณนั้นสูงจึงทำให้ค่า SQNR มีโอกาสสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอตลอดช่วงของสัญญาณ

## 2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF)

นิยาม ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง  $X$  (Continuous Random Variable  $X$ ) คือ

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (2.27)$$

โดยที่  $F_X(x)$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF)

ทฤษฎี สำหรับตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง  $X$  ด้วย PDF  $f_X(x)$

(a)  $f_X(x) \geq 0$  for all  $x$  ความน่าจะเป็นของทุกค่า  $x$  จะต้องมีความมากกว่า 0 กล่าวคือ ความน่าจะเป็นไม่เป็นลบ

$$(b) F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(u) du$$

$$(c) \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1 \text{ ความน่าจะเป็นของทุกค่า } x \text{ ทั้งหมดรวมกันเท่ากับ } 1$$

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไตซ์แบบสมร่ำเสมอและแบบไม่สมร่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง ประกอบด้วย การสุ่มตัวอย่างซึ่งทำให้สัญญาณอนาล็อกไม่ต่อเนื่องในทางเวลา แต่ยังคงต่อเนื่องในทางขนาด เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถแทนสัญญาณด้วยจำนวนบิตที่ไม่จำกัด จึงมีการจัดระดับสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ขั้นตอนในการจัดระดับสัญญาณทำให้สัญญาณอนาล็อกไม่ต่อเนื่องในทางขนาด เรียกว่า การควอนไตซ์ ซึ่งมี 2 กรณี คือ การควอนไตซ์แบบสมร่ำเสมอสำหรับสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติเท่ากัน และการควอนไตซ์แบบไม่สมร่ำเสมอสำหรับสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติไม่เท่ากัน สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไตซ์ เรียกว่า ควอนไตเซชันนอยส์ เนื่องจากสัญญาณเสียงมีการกระจายทางสถิติไม่เท่ากันจึงต้องมีการทำคอมแพนดิง ซึ่งหมายถึงในภาคส่งทำการอัดสัญญาณก่อนการสุ่มตัวอย่าง และในภาครับหลังจากที่ถอดรหัสแล้วจะทำการบีบสัญญาณกลับคืนมา ซึ่งในโครงการนี้จะใช้ลักษณะความไม่สมร่ำเสมอแบบ  $\mu$ -law Companding การควอนไตซ์สัญญาณในกรณีที่มีการทำคอมแพนดิง กรณีที่มีการอัดสัญญาณจะทำการแบ่งระดับสัญญาณเป็นช่วงเรียกว่า เซกเมนต์ (segment) โดยในแต่ละเซกเมนต์สามารถประมาณเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบสมร่ำเสมอได้ และการหาค่ากำลังของสัญญาณต่อกำลังของควอนไตเซชันนอยส์จะถูกนำมาพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไตซ์แบบสมร่ำเสมอและแบบไม่สมร่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินโครงการ

การศึกษาค้นคว้าโครงการ เรื่อง ประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และแบบไม่สม่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียงพูด ใช้วิธีการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองกระบวนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยสนใจพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการควอนไทซ์เป็นหลัก ซึ่งมีวิธีการดำเนินโครงการดังนี้

#### 3.1 การศึกษาหลักการและทฤษฎี

##### 3.1.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ PCM ซึ่งประกอบด้วย การสุ่มตัวอย่าง การควอนไทซ์ และการเข้ารหัส โดยเน้นศึกษาการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Quantization) และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Quantization:  $\mu$ -law Companding) เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพ

ศึกษากำลังของสัญญาณเสียง กำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการควอนไทซ์และผลกระทบของสัญญาณรบกวน โดยแสดงผลในรูปแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) ซึ่งหลักการและทฤษฎีทั้งหมดนี้ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

##### 3.1.2 โปรแกรม MATLAB

ศึกษาการเขียนโปรแกรม MATLAB การเขียนโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ อาร์เรย์ ตัวดำเนินการอาร์เรย์ สตริง การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ การประมวลผล กราฟิกและการวาดภาพ

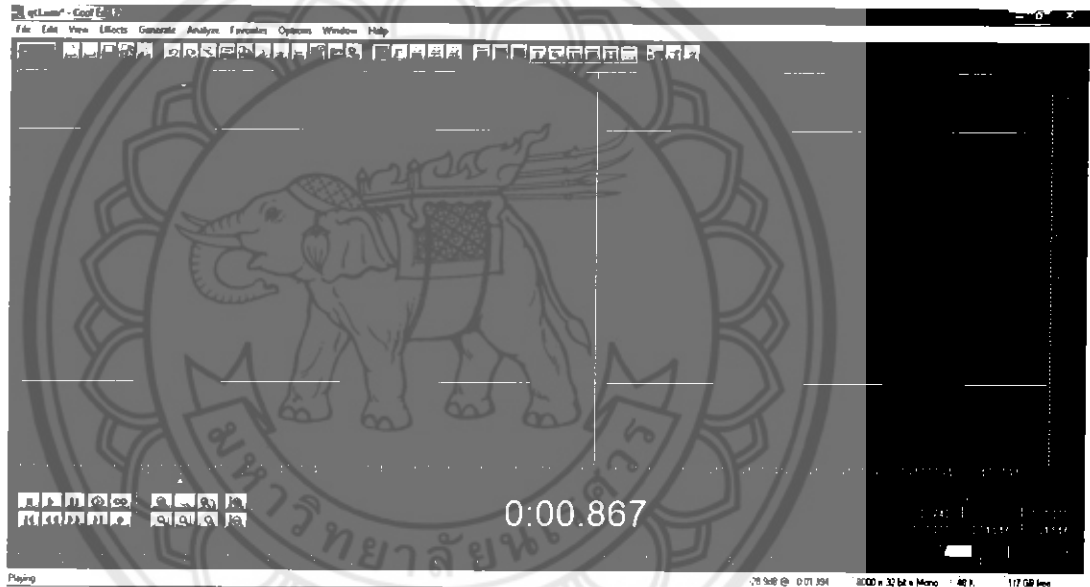
##### 3.1.3 โปรแกรม Cool Edit Pro

ศึกษาโปรแกรม Cool Edit Pro เพื่อนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB โดยศึกษาการบันทึกเสียง แก้ไขเสียง ตัดต่อเสียง และเครื่องมือต่างๆ โปรแกรม Cool Edit Pro สามารถบันทึกเป็นไฟล์ได้หลายรูปแบบ เช่น WAV, WMA, MP3, RM, AVI, OGG และอื่นๆ

### 3.2 การประยุกต์หลักการและทฤษฎีสำหรับการเขียนโปรแกรม

#### 3.2.1 การบันทึกสัญญาณเสียง

โครงงานนี้อาศัยโปรแกรม Cool Edit Pro ในการบันทึกสัญญาณเสียงพูดซึ่งเป็นสัญญาณอินพุตของระบบ กราฟิกส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของโปรแกรม Cool Edit Pro แสดงดังรูป 3.1 โดยปกติสัญญาณเสียงพูดของมนุษย์มีความถี่อยู่ในช่วง 300-3,400 เฮิรตซ์ และมีแบนด์วิดท์ที่ถูกจัดสรรให้ใช้งานสำหรับช่องส่งสัญญาณ 4,000 เฮิรตซ์ ดังนั้นความถี่สุ่มเท่ากับ 8,000 เฮิรตซ์ เพื่อให้สัญญาณเสียงที่ถูกบันทึกสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม MATLAB ได้ จึงต้องใช้ความถี่สุ่มเท่ากับ 11,025 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม โดยบันทึกสัญญาณเสียงในรูปแบบ โมโนและจัดเก็บไฟล์ของสัญญาณเสียงไว้ในรูปแบบ Windows PCM (\*.wav)



รูปที่ 3.1 กราฟิกส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของโปรแกรม Cool Edit Pro

ที่มา: โปรแกรม Cool Edit Pro2.0

#### 3.2.2 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การเขียนโปรแกรม MATLAB จำลองการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ PCM ซึ่งมี 3 ขั้นตอน คือ การสุ่มตัวอย่าง การควอนไทซ์ และการเข้ารหัส โดยการสุ่มตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบชั่วขณะ (Instantaneous Sampling or Flat-top PAM) ซึ่งเป็นการสุ่มตัวอย่างที่ทำให้สัญญาณส่วนบนเรียบ ขั้นตอนต่อมาคือการควอนไทซ์สัญญาณ เนื่องจากการควอนไทซ์แบบสมมาตรเหมาะสมสำหรับสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติเท่าๆกัน แต่สัญญาณเสียงเป็นสัญญาณที่มีการกระจายตัวทางสถิติไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องทำการควอนไทซ์แบบไม่สมมาตร ในขั้นตอนสุดท้ายของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลคือการเข้ารหัส ซึ่งเป็นขั้นตอน



การแปลงข้อมูลไบนารีให้เป็นสัญญาณดิจิทัล กระบวนการเหล่านี้สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีในหัวข้อ 3.1

### 3.3 การวิเคราะห์และสรุปผล

การวิเคราะห์และการสรุปผลของการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอสำหรับโครงการนี้มี 2 วิธี คือ การฟังและการคำนวณ โดยการฟังจะพิจารณาจากความชัดของสัญญาณเสียงพูดเมื่อถูกแปลงกลับมาหลังจากผ่านกระบวนการควอนไทซ์ ส่วนของการคำนวณจะพิจารณาประสิทธิภาพในรูปแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (SNR) เนื่องจากในโครงการนี้สนใจพิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการควอนไทซ์เป็นหลัก ดังนั้นการพิจารณาประสิทธิภาพจึงอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของควอนไทเซชันนอยส์ (SQNR)

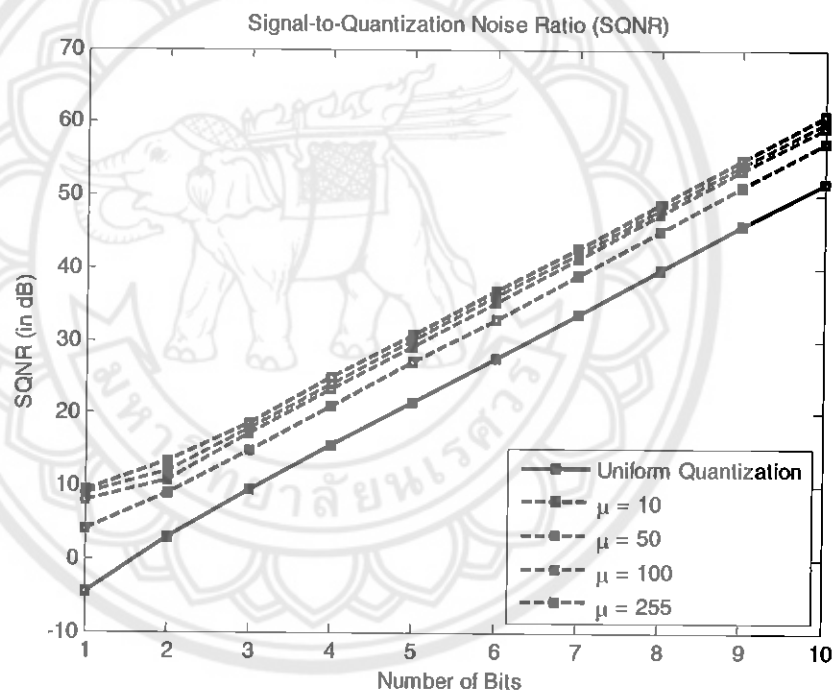
ในบทต่อไปของโครงการเป็นส่วนของการเขียนโปรแกรม MATLAB และออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้เพื่อแสดงผลการทดลองและการคำนวณ โดยเขียนและออกแบบโปรแกรมให้ป้อนอินพุตจำนวนบิตต่อแซมเปิลลงในส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ จากนั้นโปรแกรมจะทำการประมวลผลออกมา จึงนำผลที่ได้ไปพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอและการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การทดสอบหาค่า SQNR ของสัญญาณเสียงผ่านโปรแกรม MATLAB โดยการจำลองการควอนไทซ์เพื่อประมวลผลหาค่ากำลังของสัญญาณ และกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระบวนการควอนไทซ์

#### 4.1 อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการควอนไทซ์ (Signal-to-Quantization Noise Ratio: SQNR)

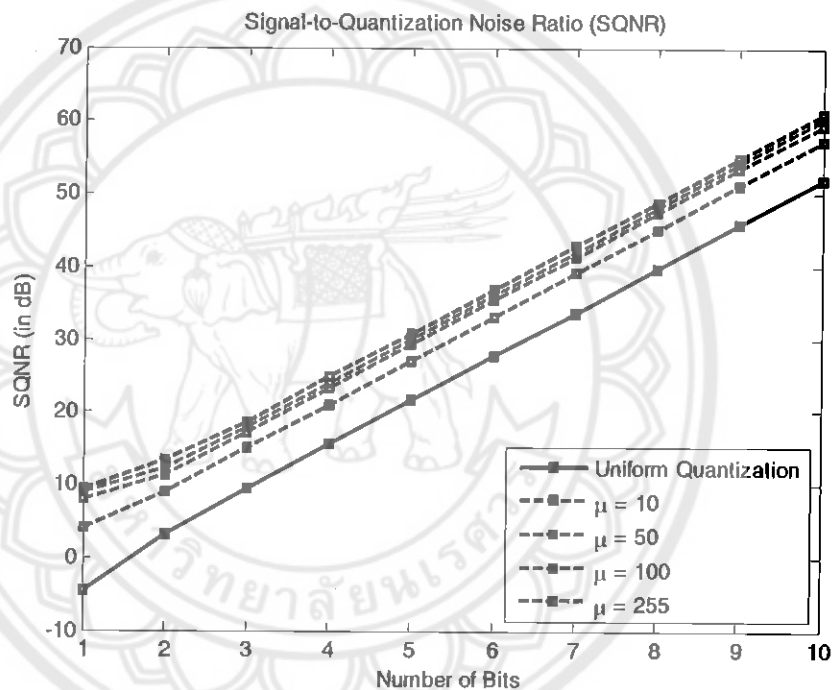


รูปที่ 4.1 SQNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที

จากรูปที่ 4.1 SQNR ของเสียงเพลงขนาด 1 วินาที ประกอบด้วยกราฟ 5 กรณี คือ กราฟ Signal-to-Uniform Quantization Noise Ratio กราฟ Signal-to-Non-uniform Quantization Noise Ratio ที่มีค่า  $\mu = 10$ ,  $\mu = 50$ ,  $\mu = 100$  และ  $\mu = 255$  จากการทดสอบการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ พบว่าการอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu$  บางค่า ช่วยให้สัญญาณมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และการอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu > 0$  ทุกค่าส่งผลให้กำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้นมากกว่ากรณีที่ยังไม่มีการอัด

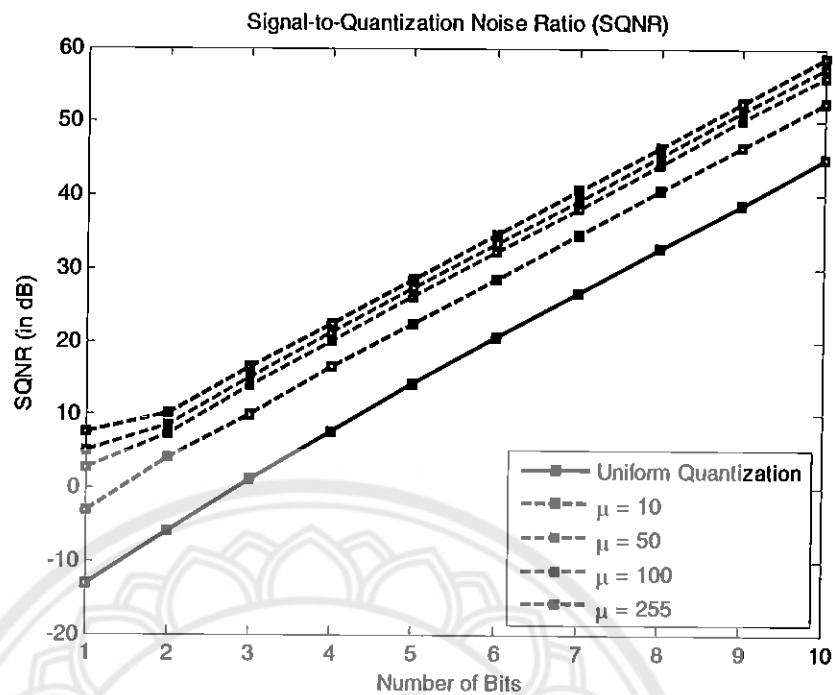
สัญญาณ อีกทั้งการอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu$  ที่สูงส่งผลให้กำลังของสัญญาณมีค่าสูงตามด้วย เมื่อผ่านการควอนไทซ์สัญญาณที่ถูกอัดจึงมีค่า SQNR สูงกว่าสัญญาณปกติ

สัญญาณที่อัดด้วยค่า  $\mu=255$  มีค่า SQNR มากที่สุด โดยที่สัญญาณที่อัดด้วยค่า  $\mu=100$ ,  $\mu=50$  และ  $\mu=10$  มีค่า SQNR ลดลงตามลำดับ การทดสอบใช้ค่า  $n=1$  ถึง  $n=10$  การแสดงค่า SQNR ในรูปของ dB ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงและมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่า  $n$  เนื่องจากการเพิ่มค่า  $n$  ทำให้ระดับการควอนไทซ์ดีขึ้น ส่งผลให้สัญญาณรบกวนน้อยลง ดังนั้น ค่า SQNR จึงเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบค่า SQNR นี้สอดคล้องกับค่า SQNR ที่ได้จากการพิสูจน์ทฤษฎีซึ่งปรากฏอยู่ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.2 SQNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที

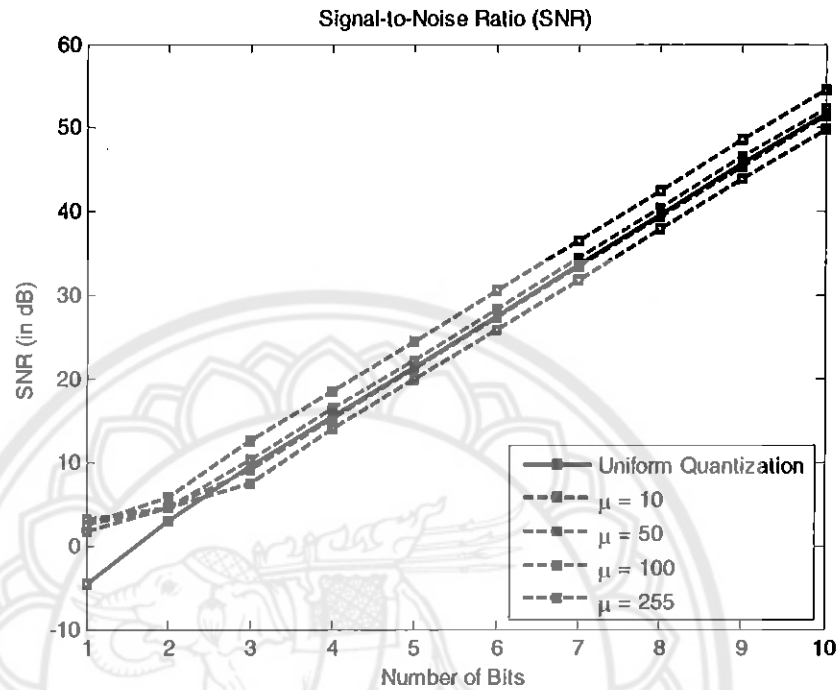
จากรูปที่ 4.2 SQNR ของเสียงเพลงขนาด 10 วินาที พบว่า ค่า SQNR จากการทดสอบสัญญาณเสียงขนาด 10 วินาที มีค่าเท่าๆกันกับสัญญาณเสียงขนาด 1 วินาที, สัญญาณเสียงขนาด 2 วินาที, สัญญาณเสียงขนาด 3 วินาที, สัญญาณเสียงขนาด 4 วินาที และสัญญาณเสียง 5 วินาที จึงสรุปได้ว่าค่า SQNR ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสัญญาณ



รูปที่ 4.3 SQNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที

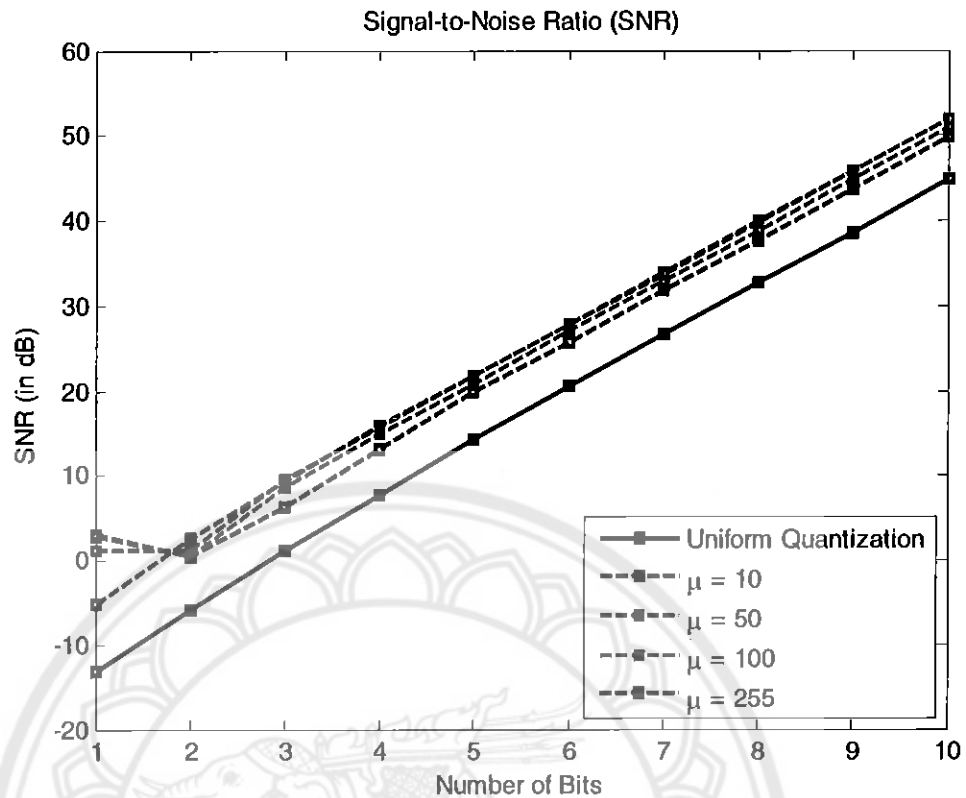
จากรูปที่ 4.3 สังเกตได้ว่าค่า SQNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที มีค่าน้อยกว่าค่า SQNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที เนื่องจากสัญญาณเสียงพูดที่นำมาทดสอบมีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง -0.2 ถึง 0.2 V เป็นผลให้กำลังของสัญญาณเสียงพูดมีค่าน้อยกว่ากำลังของสัญญาณเสียงเพลงที่มีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง -0.4 ถึง 0.4 V ในขณะที่สัญญาณรบกวนมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นค่า SQNR ของสัญญาณเสียงพูดจึงมีค่าน้อยกว่าค่า SQNR ของสัญญาณเสียงเพลง

## 4.2 อัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR)



รูปที่ 4.4 SNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที

จากรูปที่ 4.4 SNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที เป็นค่า SNR หลังจากยึดสัญญาณกลับคืนหลังการควอนไทซ์ จากการทดสอบพบว่า สัญญาณที่ถูกยึดด้วยค่า  $\mu = 10$  มีค่า SNR มากที่สุด ตามด้วยสัญญาณที่ถูกยึดด้วยค่า  $\mu = 50$ , สัญญาณปกติ, สัญญาณที่ถูกยึดด้วยค่า  $\mu = 100$  และสัญญาณที่ถูกยึดด้วยค่า  $\mu = 255$  ซึ่งมีค่า SNR ลดลงตามลำดับ กราฟของรูปที่ 4.4 สามารถอธิบายได้ด้วย PDF ของสัญญาณแต่ละกรณี เนื่องจากการยึดสัญญาณแต่ละกรณีได้ PDF ที่มีการกระจายทางสถิติไม่เหมือนกัน ดังนั้นสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติสม่ำเสมอมากที่สุดจึงมีค่า SNR สูงสุด



รูปที่ 4.5 SNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที

จากรูปที่ 4.5 SNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที เป็นค่า SNR หลังจากยึดสัญญาณกลับคืนหลังการควอนไทซ์ จากการทดสอบพบว่า สัญญาณที่ถูกอัดด้วยค่า  $\mu = 10$  มีค่า SNR มากที่สุด ตามด้วยสัญญาณที่ถูกอัดด้วยค่า  $\mu = 50$ ,  $\mu = 100$ ,  $\mu = 255$  และสัญญาณปกติที่ไม่ได้รับการอัดสัญญาณมีค่า SNR ลดลงตามลำดับ กราฟของรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ด้วย PDF เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 เพราะการอัดสัญญาณแต่ละกรณีได้ PDF ที่มีการกระจายทางสถิติไม่เหมือนกัน ดังนั้นสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติสม่ำเสมอมากที่สุดจึงมีค่า SNR สูงสุด

การทดสอบหาค่า SQNR และ SNR ของสัญญาณเสียงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควอนไทซ์ 2 กรณี คือ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาคือ จำนวนบิตต่อแซมเปิล และค่าสัมประสิทธิ์  $\mu$  การอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu$  ที่ต่างกันทำให้ได้กำลังและลักษณะการกระจายทางสถิติของสัญญาณต่างกัน การอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu$  ที่สูงจะได้กำลังที่มีค่าสูง ดังนั้น การเปลี่ยนจำนวนบิตต่อแซมเปิล และค่า  $\mu$  จึงส่งผลให้ได้ค่า SQNR และ SNR ที่แตกต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุป

จากการทดสอบหาค่า SQNR พบว่าสัญญาณเสียงมีการกระจายทางสถิติแบบไม่สม่ำเสมอ สัญญาณเสียงซึ่งมี PDF ลักษณะแบบเกาส์เซียน เมื่อทำการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอจึงเกิดสัญญาณรบกวนมากกว่าการใช้สัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติแบบสม่ำเสมอ การลดสัญญาณรบกวนทำได้โดยเพิ่มจำนวนบิตต่อแซมเปิล เพื่อให้ระดับการควอนไทซ์ถี่ขึ้น ระยะห่างระหว่างระดับการควอนไทซ์จึงลดลง ส่งผลให้สัญญาณรบกวนลดลงด้วย แต่วิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้บิตอย่างไม่มีประสิทธิภาพ จึงไม่เป็นที่นิยม วิธีที่ใช้กันทั่วไปคือการอัดสัญญาณแล้วนำไปผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ ซึ่งเรียกว่าการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ การทดสอบในโครงการนี้ใช้การควอนไทซ์แบบ  $\mu$ -law

การอัดสัญญาณเสียงด้วย  $\mu > 0$  บางค่าส่งผลให้สัญญาณมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่า SQNR ของสัญญาณเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอและการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ ผลคือ สัญญาณเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอมีค่า SQNR น้อยกว่าสัญญาณเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากสัญญาณเสียงถูกอัดให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นและกำลังของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น การอัดสัญญาณด้วยค่า  $\mu$  สูงๆ กำลังของสัญญาณจะสูงตามด้วย ดังนั้นค่า SQNR จึงแปรผันตามค่า  $\mu$

ค่า SQNR ที่คำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB แสดงผลในรูปของ dB ซึ่งกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นไปตามทฤษฎีการหาค่า SQNR ทางความน่าจะเป็น

การบีบอัดสัญญาณคืบหลังจากการควอนไทซ์เป็นการบีบอัดสัญญาณรบกวนกลับคืนมาเช่นกัน ดังนั้นสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติค่อนข้างสม่ำเสมอจะมีค่า SNR มากกว่าสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการเปลี่ยนค่าจำนวนบิตต่อแซมเปิล และค่า  $\mu$  ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวทางสถิติของ PDF และกำลังของสัญญาณ จึงทำให้ได้ค่า SQNR และ SNR ที่แตกต่างกัน

## เอกสารอ้างอิง

บัณฑิต ไรจน์อรยานนท์. (2541). หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดร. ปริญา สวงนิตย์. (2553). คู่มือ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: บริษัท  
ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด.

Asst. Prof. Dr. Surachet Kanprachar. (Academic year 2011). Digital Communications.

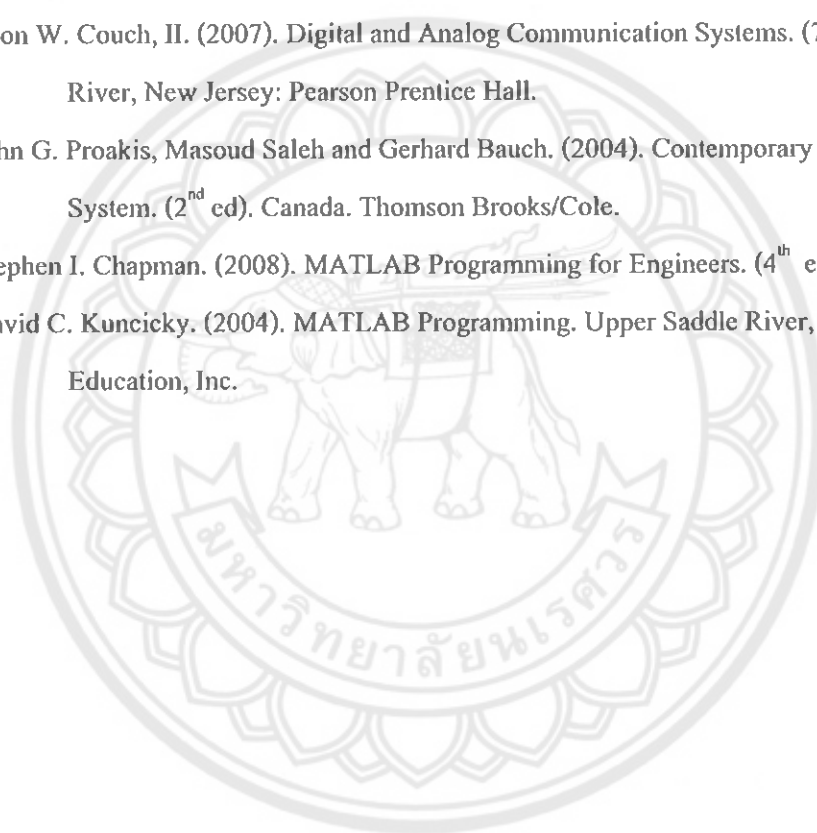
Phitsanulok: Faculty of Engineering at Naresuan University.

Leon W. Couch, II. (2007). Digital and Analog Communication Systems. (7<sup>th</sup> ed). Upper Saddle  
River, New Jersey: Pearson Prentice Hall.

John G. Proakis, Masoud Saleh and Gerhard Bauch. (2004). Contemporary Communication  
System. (2<sup>nd</sup> ed). Canada. Thomson Brooks/Cole.

Stephen I. Chapman. (2008). MATLAB Programming for Engineers. (4<sup>th</sup> ed). Canada: Webcom.

David C. Kuncicky. (2004). MATLAB Programming. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson  
Education, Inc.







ภาคผนวก ก  
การพิสูจน์ค่า SNR ของสัญญาณที่มีการกระจายตัวทางสถิติแบบ  
เกาส์เซียน

การพิสูจน์หาค่า SNR ของสัญญาณที่มีการกระจายตัวทางสถิติแบบเกาส์เซียน

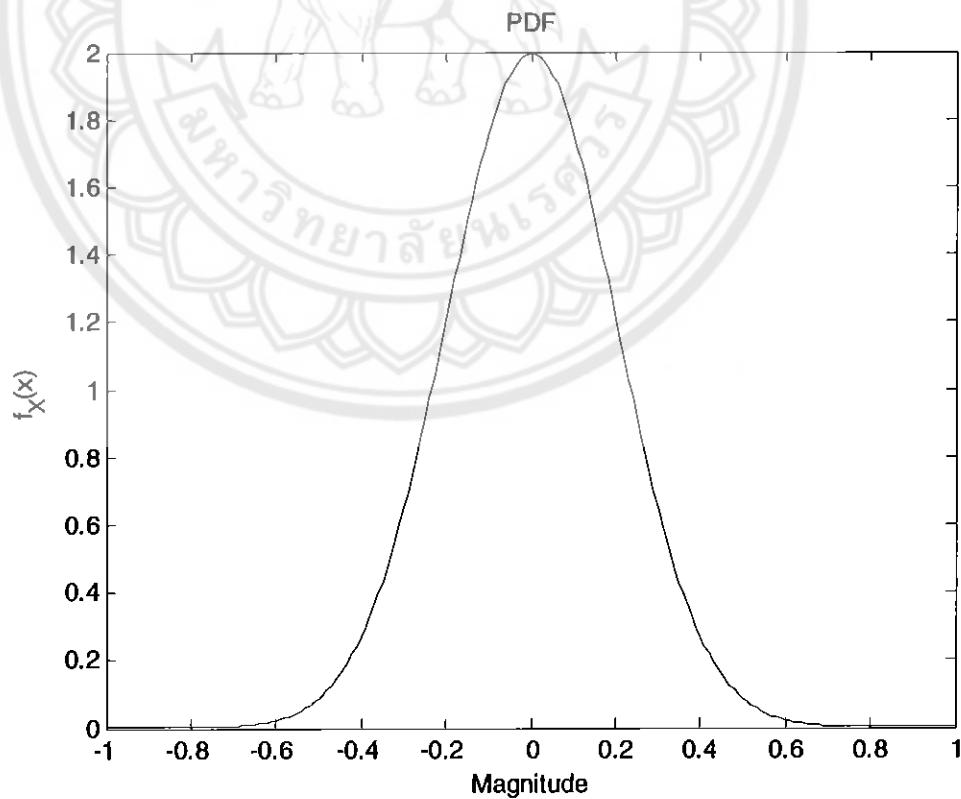
เมื่อ ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) ของ  $X$  คือ

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

กำหนดให้  $\mu = 0, \sigma = 0.2$  และ  $-1 \leq x \leq 1$   
จะได้

$$f_X(x) = \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}}$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่มีลักษณะการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียนซึ่งมีค่า  $\mu = 0, \sigma = 0.2$  และ  $-1 \leq x \leq 1$  แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1ก PDF ของสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน

## กำลังของสัญญาณ (Signal Power)

$$P_{signal} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_X(x) dx$$

แทนค่า

$$P_{signal} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx$$

$$P_{signal} = 0.0400$$

## กำลังของสัญญาณรบกวน (Noise Power)

$$P_{noise} = \sum_{k=1}^M \overline{e_k^2}$$

$$\text{โดยที่ } \overline{e_k^2} = \int_{x_{k-1}}^{x_k} (x - \tilde{x}_k)^2 f_X(x) dx$$

เมื่อ  $n=1$ 

$$\tilde{x}_k = \{-0.5000, 0.5000\}$$

$$x_k = \{-1.0000, 0, 1.0000\}$$

แทนค่า

$$\overline{e_1^2} = \int_{-1}^0 (x - (-0.5))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 65.2115 \times 10^{-3}$$

$$\overline{e_2^2} = \int_0^1 (x - 0.5)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 65.2115 \times 10^{-3}$$

$$\therefore P_{noise, n=1} = 0.1304$$

เมื่อ  $n=2$ 

$$\tilde{x}_k = \{-0.7500, -0.2500, 0.2500, 0.7500\}$$

$$x_k = \{-1.0000, -0.5000, 0, 0.5000, 1.0000\}$$

แทนค่า

$$\overline{e_1^2} = \int_{-1}^{-0.5} (x - (-0.75))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 2.3564 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_2^2} = \int_{-0.5}^0 (x - (-0.25))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 10.7193 \times 10^{-3}$$

$$\overline{e_3^2} = \int_0^{0.5} (x - 0.25)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 10.7193 \times 10^{-3}$$

$$\overline{e_4^2} = \int_{-0.5}^1 (x - 0.75)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.3564 \times 10^{-4}$$

$$\therefore P_{noise, n=2} = 0.0219$$

เมื่อ  $n=3$

$$\tilde{x}_k = \{-0.8750, -0.6250, -0.3750, -0.1250, 0.1250, 0.3750, 0.6250, 0.8750\}$$

$$x_k = \{-1.0000, -0.7500, -0.5000, -0.2500, 0, 0.2500, 0.5000, 0.7500, 1.0000\}$$

แทนค่า

$$\overline{e_1^2} = \int_{-1}^{-0.75} (x - (-0.875))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 7.0411 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e_2^2} = \int_{-0.75}^{-0.5} (x - (-0.625))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 4.1977 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_3^2} = \int_{-0.5}^{-0.25} (x - (-0.375))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 5.7288 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_4^2} = \int_{-0.25}^0 (x - (-0.125))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.9886 \times 10^{-3}$$

$$\overline{e_5^2} = \int_0^{0.25} (x - 0.125)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.9886 \times 10^{-3}$$

$$\overline{e_6^2} = \int_{0.25}^{0.5} (x - 0.375)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 5.7288 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_7^2} = \int_{0.5}^{0.75} (x - 0.625)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 4.1977 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_8^2} = \int_{0.75}^1 (x - 0.875)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 7.0411 \times 10^{-7}$$

$$\therefore P_{noise, n=3} = 5.2083 \times 10^{-3}$$

เมื่อ  $n=4$

$$\tilde{x}_k = \{-0.9375, -0.8125, -0.6875, -0.5625, -0.4375, -0.3125, -0.1875, -0.0625, \\ 0.0625, 0.1875, 0.3125, 0.4375, 0.5625, 0.6875, 0.8125, 0.9375\}$$

$$x_k = \{-1.0000, -0.8750, -0.7500, -0.6250, -0.5000, -0.3750, -0.2500, -0.1250, \\ 0, 0.1250, 0.2500, 0.3750, 0.5000, 0.6250, 0.7500, 0.8750, 1.0000\}$$

แทนค่า

$$\overline{e_1^2} = \int_{-1}^{-0.875} (x - (-0.9375))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.2163 \times 10^{-9}$$

$$\overline{e_2^2} = \int_{-0.875}^{-0.75} (x - (-0.8125))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2569 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e_3^2} = \int_{-0.75}^{-0.625} (x - (-0.6875))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.1725 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_4^2} = \int_{-0.625}^{-0.5} (x - (-0.5625))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 7.4976 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_5^2} = \int_{-0.5}^{-0.375} (x - (-0.4375))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.2948 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_6^2} = \int_{-0.375}^{-0.25} (x - (-0.3125))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.9735 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_7^2} = \int_{-0.25}^{-0.125} (x - (-0.1875))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.0841 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_8^2} = \int_{-0.125}^0 (x - (-0.0625))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.0114 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_9^2} = \int_0^{0.125} (x - 0.0625)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.0114 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_{10}^2} = \int_{-0.125}^{-0.25} (x - 0.1875)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.0841 \times 10^{-4}$$

$$\overline{e_{11}^2} = \int_{-0.25}^{-0.375} (x - 0.3125)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.9735 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_{12}^2} = \int_{-0.25}^{-0.5} (x - 0.4375)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.2948 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_{13}^2} = \int_{-0.5}^{-0.625} (x - 0.5625)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 7.4976 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_{14}^2} = \int_{-0.625}^{-0.75} (x - 0.6875)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.1725 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_{15}^2} = \int_{-0.75}^{-0.875} (x - 0.8125)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2569 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e_{16}^2} = \int_{-0.875}^{-1} (x - 0.9375)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.2163 \times 10^{-9}$$

$$\therefore P_{noise, n=4} = 1.3021 \times 10^{-3}$$

เมื่อ  $n=5$

$$\tilde{x}_k = \{-0.9688, -0.9063, -0.8438, -0.7813, -0.7188, -0.6563, -0.5938, -0.5313, \\ -0.4688, -0.4063, -0.3438, -0.2813, -0.2188, -0.1563, -0.0938, -0.0313, \\ 0.0313, 0.0938, 0.1563, 0.2188, 0.2813, 0.3438, 0.4063, 0.4688, 0.5313, \\ 0.5938, 0.6563, 0.7188, 0.7813, 0.8438, 0.9063, 0.9688\}$$

$$x_k = \{-1.0000, -0.9375, -0.8750, -0.8125, -0.7500, -0.6875, -0.6250, -0.5625, \\ -0.5000, -0.4375, -0.3750, -0.3125, -0.2500, -0.1875, -0.1250, -0.0625 \\ 0, 0.0625, 0.1250, 0.1875, 0.2500, 0.3125, 0.3750, 0.4375, 0.5000 \\ 0.5625, 0.6250, 0.6875, 0.7500, 0.8125, 0.8750, 0.9375, 1.0000\}$$

$$\overline{e_1^2} = \int_{-1}^{-0.9375} (x - (-0.9688))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.8229 \times 10^{-10}$$

$$\overline{e_2^2} = \int_{-0.9375}^{-0.875} (x - (-0.9063))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.6219 \times 10^{-9}$$

$$\overline{e_3^2} = \int_{-0.875}^{-0.8125} (x - (-0.8438))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.2474 \times 10^{-9}$$

$$\overline{e_4^2} = \int_{-0.8125}^{-0.75} (x - (-0.7813))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.1851 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e_5^2} = \int_{-0.75}^{-0.6875} (x - (-0.7188))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.9397 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e_6^2} = \int_{-0.6875}^{-0.625} (x - (-0.6563))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.0013 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e_7^2} = \int_{-0.625}^{-0.5625} (x - (-0.5938))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 5.2412 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e_8^2} = \int_{-0.5625}^{-0.5} (x - (-0.5313))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2464 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_9^2} = \int_{-0.5}^{-0.4375} (x - (-0.4688))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.6920 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_{10}^2} = \int_{-0.4375}^{-0.375} (x - (-0.4063))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 5.2801 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_{11}^2} = \int_{-0.375}^{-0.3125} (x - (-0.3438))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.4054 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e_{12}^2} = \int_{-0.3125}^{-0.25} (x - (-0.2813))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.5216 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_{13}^2} = \int_{-0.25}^{-0.1875} (x - (-0.2188))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.2357 \times 10^{-5}$$

$$\overline{e_{14}^2} = \int_{-0.1875}^{-0.125} (x - (-0.1563))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.9835 \times 10^{-5}$$

$$e_{15}^2 = \int_{0.125}^{0.0625} (x - (-0.0938))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.6162 \times 10^{-5}$$

$$e_{16}^2 = \int_{0.0625}^0 (x - (-0.0313))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.9808 \times 10^{-5}$$

$$e_{17}^2 = \int_{0.0625}^{0.0625} (x - 0.0313)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.9808 \times 10^{-5}$$

$$e_{18}^2 = \int_{0.0625}^{0.125} (x - 0.0938)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.6162 \times 10^{-5}$$

$$e_{19}^2 = \int_{0.125}^{0.1875} (x - 0.1563)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.9835 \times 10^{-5}$$

$$e_{20}^2 = \int_{0.1875}^{0.25} (x - 0.2188)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.2357 \times 10^{-5}$$

$$e_{21}^2 = \int_{0.25}^{0.3125} (x - 0.2813)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.5216 \times 10^{-5}$$

$$e_{22}^2 = \int_{0.3125}^{0.375} (x - 0.3438)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.4054 \times 10^{-6}$$

$$e_{23}^2 = \int_{0.375}^{0.4375} (x - 0.4063)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 5.2801 \times 10^{-6}$$

$$e_{24}^2 = \int_{0.4375}^{0.5} (x - 0.4688)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.6920 \times 10^{-6}$$

$$e_{25}^2 = \int_{0.5}^{0.5625} (x - 0.5313)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2464 \times 10^{-6}$$

$$e_{26}^2 = \int_{0.5625}^{0.625} (x - 0.5938)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 5.2412 \times 10^{-7}$$

$$e_{27}^2 = \int_{0.625}^{0.6875} (x - 0.6563)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.0013 \times 10^{-7}$$

$$e_{28}^2 = \int_{0.6875}^{0.75} (x - 0.7188)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.9397 \times 10^{-8}$$

$$e_{29}^2 = \int_{0.75}^{0.8125} (x - 0.7813)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.1851 \times 10^{-8}$$

$$e_{30}^2 = \int_{0.8125}^{0.875} (x - 0.8438)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.2474 \times 10^{-9}$$

$$e_{31}^2 = \int_{0.875}^{0.9375} (x - 0.9063)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.6219 \times 10^{-9}$$

$$e_{32}^2 = \int_{0.9375}^1 (x - 0.9688)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.8229 \times 10^{-10}$$

$$\therefore P_{noise,n=5} = 3.2571 \times 10^{-4}$$

110  $n=6$

$$\bar{x}_k = \{-0.9844, -0.9531, -0.9219, -0.8906, -0.8594, -0.8281, -0.7969, -0.7656, \\ -0.7344, -0.7031, -0.6719, -0.6406, -0.6094, -0.5781, -0.5469, -0.5156, \\ -0.4844, -0.4531, -0.4219, -0.3906, -0.3594, -0.3281, -0.2969, -0.2656, \\ -0.2344, -0.2031, -0.1719, -0.1406, -0.1094, -0.0781, -0.0469, -0.0156, \\ 0.0156, 0.0469, 0.0781, 0.1094, 0.1406, 0.1719, 0.2031, 0.2344, \\ 0.2656, 0.2969, 0.3281, 0.3594, 0.3906, 0.4219, 0.4531, 0.4844, \\ 0.5156, 0.5469, 0.5781, 0.6094, 0.6406, 0.6719, 0.7031, 0.7344, \\ 0.7656, 0.7969, 0.8281, 0.8594, 0.8906, 0.9219, 0.9531, 0.9844\}$$

$$x_k = \{-1.0000, -0.9688, -0.9375, -0.9063, -0.8750, -0.8438, -0.8125, -0.7813, \\ -0.7500, -0.7188, -0.6875, -0.6563, -0.6250, -0.5938, -0.5625, -0.5313, \\ -0.5000, -0.4688, -0.4375, -0.4063, -0.3750, -0.3438, -0.3125, -0.2813, \\ -0.2500, -0.2188, -0.1875, -0.1563, -0.1250, -0.0938, -0.0625, -0.0313, \\ 0, 0.0313, 0.0625, 0.0938, 0.1250, 0.1563, 0.1875, 0.2188, 0.2500, \\ 0.2813, 0.3125, 0.3438, 0.3750, 0.4063, 0.4375, 0.4688, 0.5000, \\ 0.5313, 0.5625, 0.5938, 0.6250, 0.6563, 0.6875, 0.7188, 0.7500, \\ 0.7813, 0.8125, 0.8438, 0.8750, 0.9063, 0.9375, 0.9688, 1.0000\}$$

$$\bar{e}_1^2 = \int_{-1}^{-0.9688} (x - (-0.9844))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.8886 \times 10^{-11}$$

$$\bar{e}_2^2 = \int_{-0.9688}^{-0.9375} (x - (-0.9531))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 6.1873 \times 10^{-11}$$

$$\bar{e}_3^2 = \int_{-0.9375}^{-0.9063} (x - (-0.9219))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.2740 \times 10^{-10}$$

$$\bar{e}_4^2 = \int_{-0.9063}^{-0.875} (x - (-0.8906))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.5996 \times 10^{-10}$$

$$\bar{e}_5^2 = \int_{-0.875}^{-0.8438} (x - (-0.8594))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 5.0980 \times 10^{-10}$$

$$\bar{e}_6^2 = \int_{-0.8438}^{-0.8125} (x - (-0.8281))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 9.9094 \times 10^{-10}$$

$$\bar{e}_7^2 = \int_{-0.8125}^{-0.7813} (x - (-0.7969))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.8508 \times 10^{-9}$$

$$\bar{e}_8^2 = \int_{-0.7813}^{-0.75} (x - (-0.7656))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.4271 \times 10^{-9}$$

$$\bar{e}_9^2 = \int_{-0.75}^{-0.7188} (x - (-0.7344))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 6.0961 \times 10^{-9}$$



$$\overline{e}_{10}^2 = \int_{-0.7188}^{-0.6875} (x - (-0.7031))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.0753 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e}_{11}^2 = \int_{-0.6875}^{-0.6563} (x - (-0.6719))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.8217 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e}_{12}^2 = \int_{-0.6563}^{-0.625} (x - (-0.6406))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.0612 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e}_{13}^2 = \int_{-0.625}^{-0.5938} (x - (-0.6094))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 4.9391 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e}_{14}^2 = \int_{-0.5938}^{-0.5625} (x - (-0.5781))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 7.9065 \times 10^{-8}$$

$$\overline{e}_{15}^2 = \int_{-0.5625}^{-0.5313} (x - (-0.5469))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.2149 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{16}^2 = \int_{-0.5313}^{-0.5} (x - (-0.5156))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.8527 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{17}^2 = \int_{-0.5}^{-0.4688} (x - (-0.4844))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.7114 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{18}^2 = \int_{-0.4688}^{-0.4375} (x - (-0.4531))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.9390 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{19}^2 = \int_{-0.4375}^{-0.4063} (x - (-0.4219))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 5.4902 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{20}^2 = \int_{-0.4063}^{-0.375} (x - (-0.3906))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 7.5981 \times 10^{-7}$$

$$\overline{e}_{21}^2 = \int_{-0.375}^{-0.3438} (x - (-0.3594))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.0086 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{22}^2 = \int_{-0.3438}^{-0.3125} (x - (-0.3281))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.3297 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{23}^2 = \int_{-0.3125}^{-0.2813} (x - (-0.2969))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 1.6810 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{24}^2 = \int_{-0.2813}^{-0.25} (x - (-0.2656))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.1114 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{25}^2 = \int_{-0.25}^{-0.2188} (x - (-0.2344))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 2.5421 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{26}^2 = \int_{-0.2188}^{-0.1875} (x - (-0.2031))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.0416 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{27}^2 = \int_{-0.1875}^{-0.1563} (x - (-0.1719))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.4877 \times 10^{-6}$$

$$\overline{e}_{28}^2 = \int_{-0.1563}^{-0.125} (x - (-0.1406))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x)^2}{0.08}} dx = 3.9755 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{29}^2 = \int_{-0.125}^{-0.0938} (x - (-0.1094))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.3414 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{30}^2 = \int_{-0.0938}^{-0.0625} (x - (-0.0781))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.7144 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{31}^2 = \int_{-0.0625}^{-0.0313} (x - (-0.0469))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.9031 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{32}^2 = \int_{-0.0313}^0 (x - (-0.0156))^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 5.0723 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{33}^2 = \int_0^{0.0313} (x - 0.0156)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 5.0723 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{34}^2 = \int_{0.0313}^{0.0625} (x - 0.0469)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.9031 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{35}^2 = \int_{0.0625}^{0.0938} (x - 0.0781)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.7144 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{36}^2 = \int_{0.0938}^{0.125} (x - 0.1094)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 4.3414 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{37}^2 = \int_{0.125}^{0.1563} (x - 0.1406)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 3.9755 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{38}^2 = \int_{0.1563}^{0.1875} (x - 0.1719)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 3.4877 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{39}^2 = \int_{0.1875}^{0.2188} (x - 0.2031)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 3.0416 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{40}^2 = \int_{0.2188}^{0.25} (x - 0.2344)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 2.5421 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{41}^2 = \int_{0.25}^{0.2813} (x - 0.2656)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 2.1114 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{42}^2 = \int_{0.2813}^{0.3125} (x - 0.2969)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 1.6810 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{43}^2 = \int_{0.3125}^{0.3438} (x - 0.3281)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 1.3297 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{44}^2 = \int_{0.3438}^{0.375} (x - 0.3594)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 1.0086 \times 10^{-6}$$

$$\bar{e}_{45}^2 = \int_{0.375}^{0.4063} (x - 0.3906)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 7.5981 \times 10^{-7}$$

$$\bar{e}_{46}^2 = \int_{0.4063}^{0.4375} (x - 0.4219)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 5.4902 \times 10^{-7}$$

$$\bar{e}_{47}^2 = \int_{0.4375}^{0.4688} (x - 0.4531)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{0.08}} dx = 3.9390 \times 10^{-7}$$

$$e_{48}^2 = \int_{0.4688}^{0.5} (x-0.4844)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.7114 \times 10^{-7}$$

$$e_{49}^2 = \int_{0.5}^{0.5313} (x-0.5156)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.8527 \times 10^{-7}$$

$$e_{50}^2 = \int_{0.5313}^{0.5625} (x-0.5469)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2149 \times 10^{-7}$$

$$e_{51}^2 = \int_{0.5625}^{0.5938} (x-0.5781)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 7.9065 \times 10^{-8}$$

$$e_{52}^2 = \int_{0.5938}^{0.625} (x-0.6094)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 4.9391 \times 10^{-8}$$

$$e_{53}^2 = \int_{0.625}^{0.6563} (x-0.6406)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.0612 \times 10^{-8}$$

$$e_{54}^2 = \int_{0.6563}^{0.6875} (x-0.6719)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.8217 \times 10^{-8}$$

$$e_{55}^2 = \int_{0.6875}^{0.7188} (x-0.7031)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.0753 \times 10^{-8}$$

$$e_{56}^2 = \int_{0.7188}^{0.75} (x-0.7344)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.0961 \times 10^{-9}$$

$$e_{57}^2 = \int_{0.75}^{0.7813} (x-0.7656)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 3.4271 \times 10^{-9}$$

$$e_{58}^2 = \int_{0.7813}^{0.8125} (x-0.7969)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.8508 \times 10^{-9}$$

$$e_{59}^2 = \int_{0.8125}^{0.8438} (x-0.8281)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 9.9094 \times 10^{-10}$$

$$e_{60}^2 = \int_{0.8438}^{0.875} (x-0.8594)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 5.0980 \times 10^{-10}$$

$$e_{61}^2 = \int_{0.875}^{0.9063} (x-0.8906)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.5996 \times 10^{-10}$$

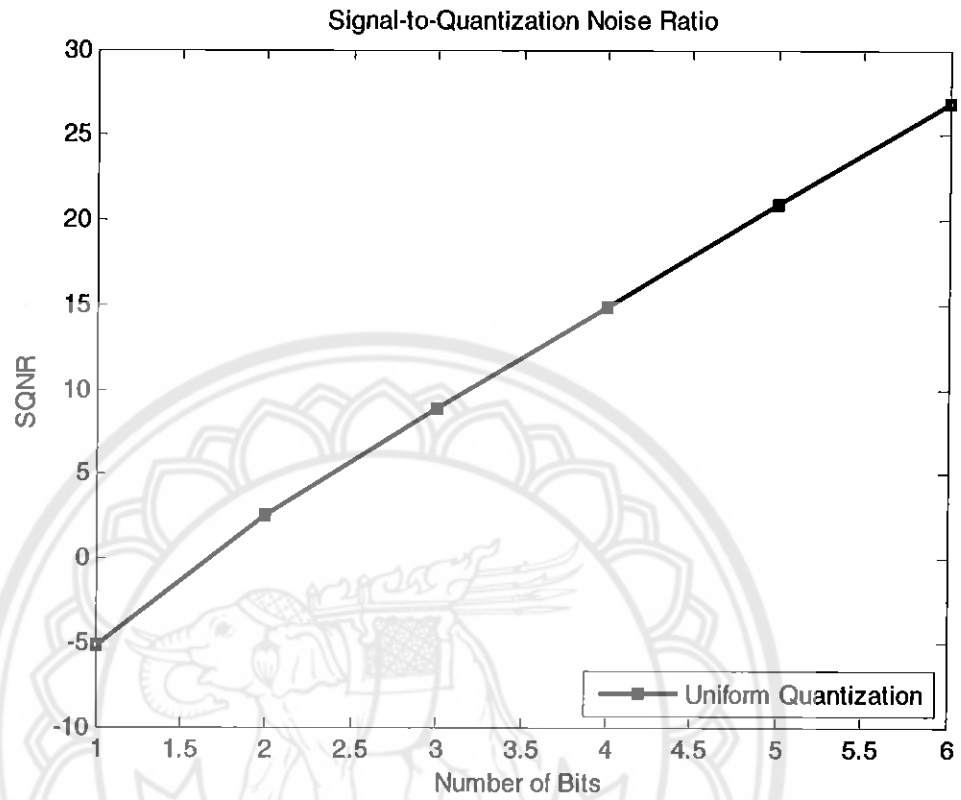
$$e_{62}^2 = \int_{0.9063}^{0.9375} (x-0.9219)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 1.2740 \times 10^{-10}$$

$$e_{63}^2 = \int_{0.9375}^{0.9688} (x-0.9531)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 6.1873 \times 10^{-11}$$

$$e_{64}^2 = \int_{0.9688}^1 (x-0.9844)^2 \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{0.08}} dx = 2.8886 \times 10^{-11}$$

$$\therefore P_{noise,n=6} = 8.1382 \times 10^{-5}$$

เมื่อนำข้อมูลค่า SQNR ที่ได้จากการคำนวณข้างต้นมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2ก SQNR ของสัญญาณที่มีการกระจายทางสถิติแบบเกาส์เซียน



ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้งานโปรแกรมคำนวณค่า SQNR

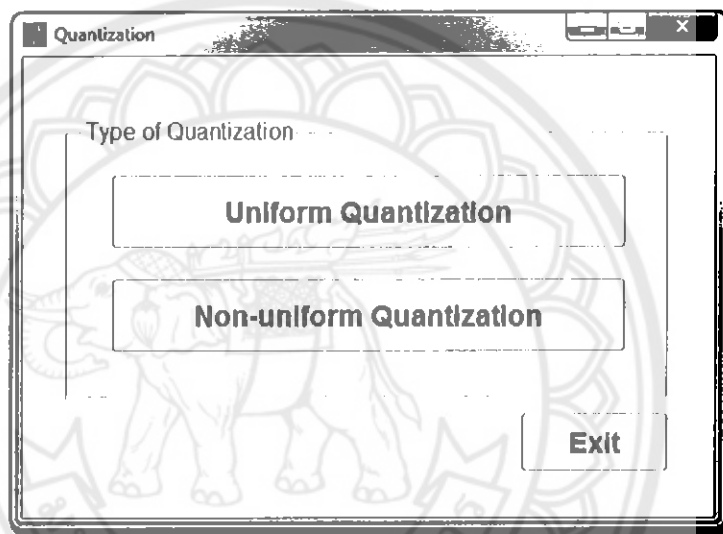
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

## คู่มือการใช้งานโปรแกรมคำนวณค่า SQNR

การทดสอบหาค่า SQNR ของสัญญาณเสียงผ่าน โปรแกรม MATLAB โดยรับข้อมูลและแสดงผลผ่านส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

### ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphical User Interface: GUI)

#### 1) รูปแบบของการควอนไทซ์

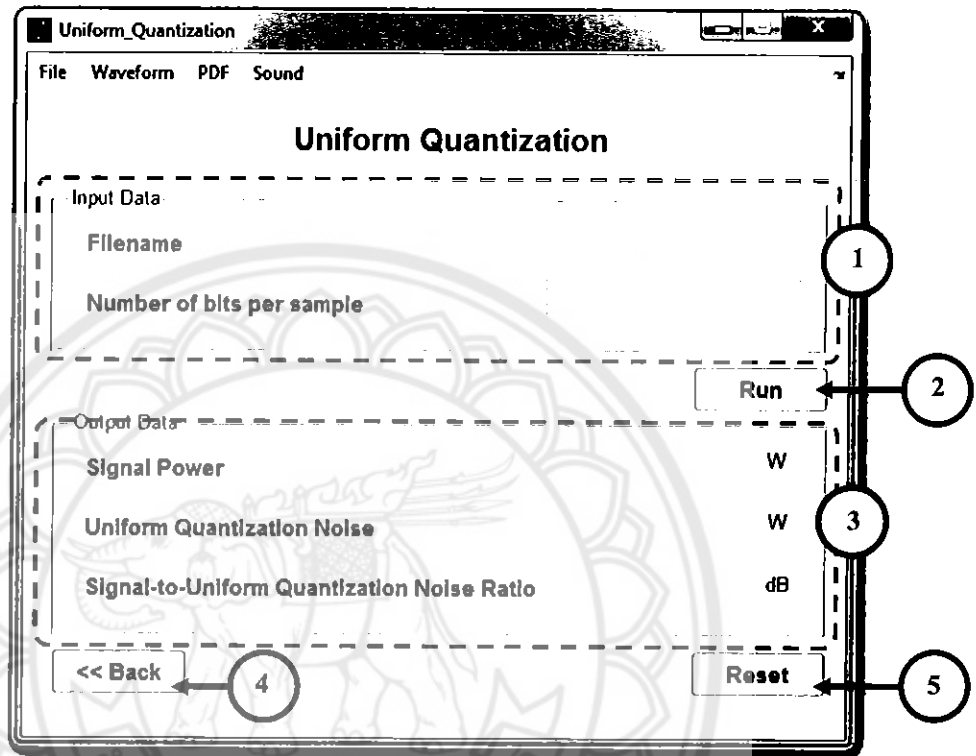


รูปที่ 1x ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการควอนไทซ์

จากรูปที่ 1 แสดงส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ส่วนแรก หรือเมนูหลักสำหรับเลือกรูปแบบการควอนไทซ์ ซึ่งมี 2 กรณีคือ การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ

## 2) การควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ

ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2ข ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ

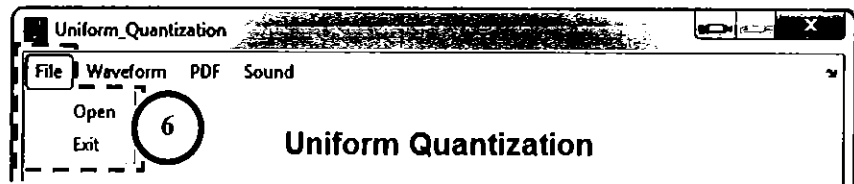
ส่วนที่ 1 ส่วนของข้อมูลขาเข้า (Input Data) ประกอบด้วย ส่วนแสดงชื่อไฟล์ข้อมูล ซึ่งจะปรากฏหลังจากเลือกไฟล์ข้อมูลจากเมนู File และส่วนสำหรับป้อนค่าจำนวนบิตต่อแซมเปิล

ส่วนที่ 2 ปุ่มสำหรับการรัน โปรแกรม

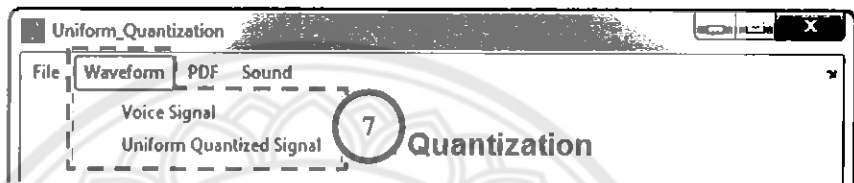
ส่วนที่ 3 ส่วนแสดงผลลัพธ์หรือข้อมูลขาออก (Output Data) จะแสดงค่ากำลังของสัญญาณ กำลังของสัญญาณรบกวน และ SQNR

ส่วนที่ 4 ปุ่มสำหรับย้อนกลับไปยังเมนูหลัก

ส่วนที่ 5 ปุ่มรีเซ็ตข้อมูล



ส่วนที่ 6 เมนู File ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู Open สำหรับเลือกไฟล์เสียง และเมนู Exit สำหรับออกจากหน้าต่างส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ



ส่วนที่ 7 เมนู Waveform ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู Voice Signal สำหรับแสดงรูปสัญญาณเสียงดั้งเดิม และเมนู Uniform Quantized Signal สำหรับแสดงรูปสัญญาณเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ



ส่วนที่ 8 เมนู PDF ประกอบด้วยเมนูย่อย 1 รายการ คือ เมนู PDF of Voice Signal สำหรับแสดงรูป PDF ของสัญญาณเสียงดั้งเดิม

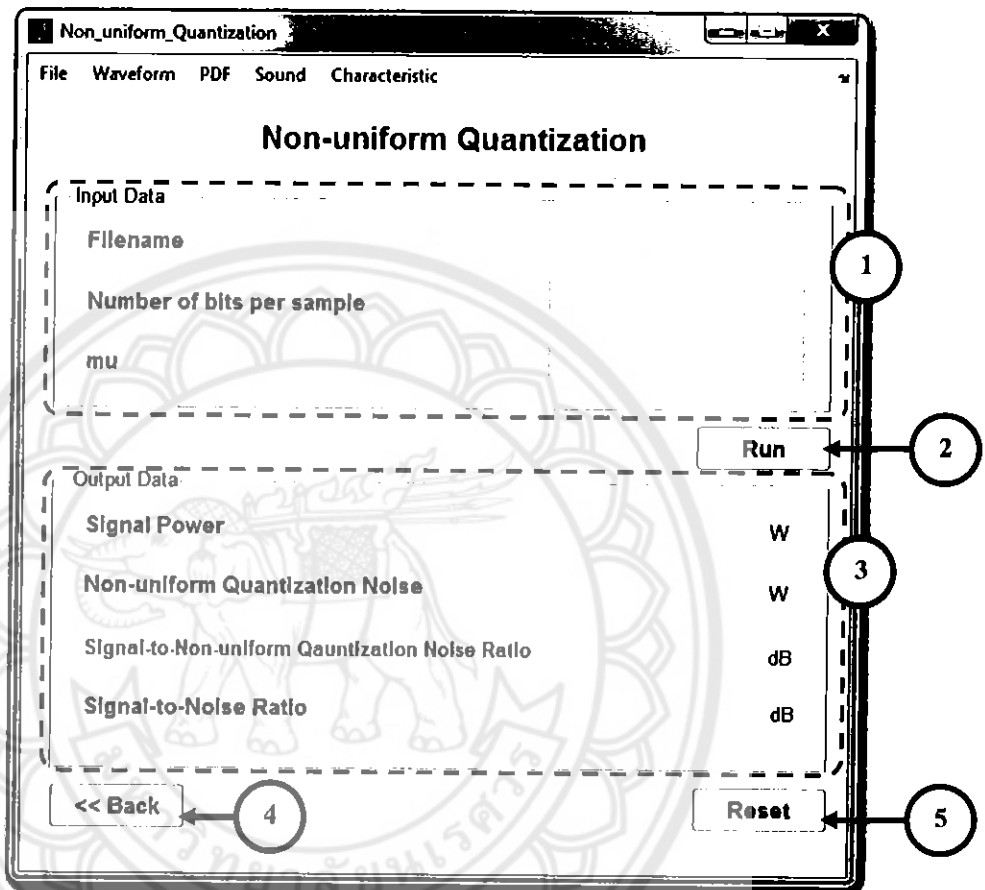


ส่วนที่ 9 เมนู Sound ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู Original Signal สำหรับฟังเสียงดั้งเดิม และเมนู Uniform Quantized Signal สำหรับฟังเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ



### 3) การควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ

ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3ข ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ

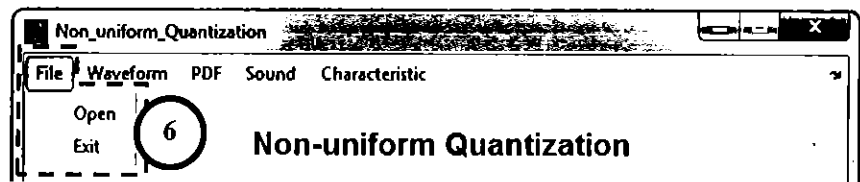
ส่วนที่ 1 ส่วนของข้อมูลขาเข้าประกอบด้วย ส่วนแสดงชื่อไฟล์ข้อมูล ส่วนสำหรับป้อนค่าจำนวนบิตต่อแซมเปิล และส่วนสำหรับป้อนค่าสัมประสิทธิ์  $\mu$

ส่วนที่ 2 ปุ่มสำหรับการรัน โปรแกรม

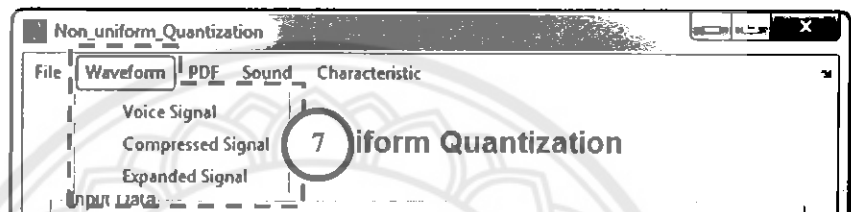
ส่วนที่ 3 ส่วนแสดงผลหรือข้อมูลขาสำหรับแสดงค่ากำลังของสัญญาณ กำลังของสัญญาณรบกวน SQNR และ SNR ซึ่งเป็นค่า SNR ที่ได้รับการยึดสัญญาณกลับคืนมาหลังจากผ่านการควอนไทซ์

ส่วนที่ 4 ปุ่มสำหรับย้อนกลับไปยังเมนูหลัก

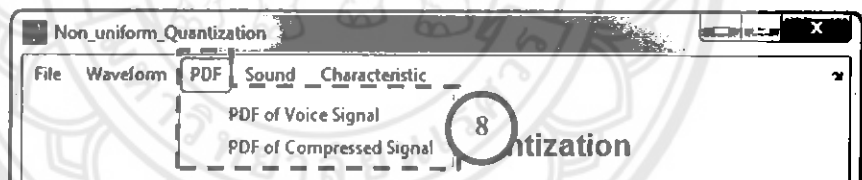
ส่วนที่ 5 ปุ่มรีเซ็ตข้อมูล



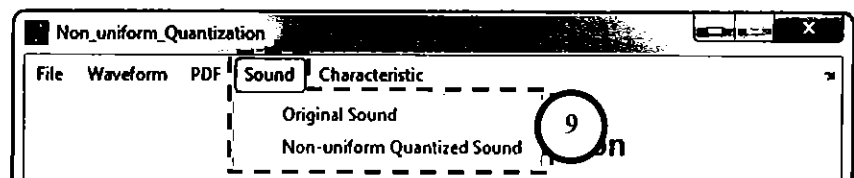
ส่วนที่ 6 เมนู File ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู Open สำหรับเลือกไฟล์เสียง และเมนู Exit สำหรับออกจากหน้าต่างส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ



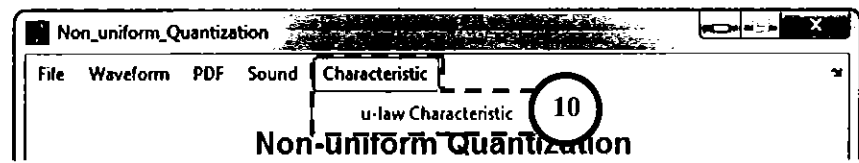
ส่วนที่ 7 เมนู Waveform ประกอบด้วยเมนูย่อย 3 รายการ คือ เมนู Voice Signal สำหรับแสดงรูปสัญญาณเสียงดั้งเดิม เมนู Compressed Signal สำหรับแสดงรูปสัญญาณเสียงที่ถูกอัดก่อนผ่านการควอนไทซ์ และเมนู Expanded Signal สำหรับแสดงรูปสัญญาณเสียงที่ถูกยืดหลังจากผ่านการควอนไทซ์



ส่วนที่ 8 เมนู PDF ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู PDF of Voice Signal สำหรับแสดงรูป PDF ของสัญญาณเสียงดั้งเดิม และเมนู PDF of Compressed Signal สำหรับแสดงรูป PDF ของสัญญาณเสียงที่ถูกอัดก่อนผ่านการควอนไทซ์



ส่วนที่ 9 เมนู Sound ประกอบด้วยเมนูย่อย 2 รายการ คือ เมนู Original Signal สำหรับฟังเสียงดั้งเดิม และเมนู Non-uniform Quantized Signal สำหรับฟังเสียงที่ผ่านการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ



ส่วนที่ 10 เมนู Characteristic ประกอบด้วยเมนูย่อย 1 รายการ คือ  $\mu$ -law Characteristic สำหรับแสดงคุณลักษณะของการอัดสัญญาณแบบ  $\mu$ -law

โปรแกรมคำนวณค่า SQNR สำหรับสัญญาณเสียงประกอบด้วย 3 หน้าต่าง คือ ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการควอนไทซ์ ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบสม่ำเสมอ และส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้สำหรับการควอนไทซ์แบบไม่สม่ำเสมอ ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้นอกจากจะแสดงค่า SQNR แล้วยังแสดงรูปสัญญาณก่อนและหลังการควอนไทซ์ ลักษณะของ PDF ของสัญญาณเสียง คุณลักษณะของการอัดสัญญาณเสียงแบบ  $\mu$ -law และสามารถฟังเสียงก่อนและหลังการควอนไทซ์ได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ล้วนเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการควอนไทซ์ระหว่างแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอสำหรับสัญญาณเสียง



## โค้ดสำหรับโปรแกรม MATLAB

การเขียนโปรแกรม แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ Function และ Script ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### ส่วนของ Function

```
%-----Compression-----%
function voice_sComp = CompressedSignal(voice_s,Mu)
for ii = 1:length(voice_s)
    voice_sComp(ii) = (log(1+(Mu*abs(voice_s(ii))))/log(1+Mu))*...
                    sign(voice_s(ii));
end

%-----PDF of voice signal-----%
function PDFvoice_s = PDF_VoiceSignal(voice_s,xRange)
HISTvoice_s = hist(voice_s,xRange);
PDFvoice_s = HISTvoice_s./length(voice_s);

%-----PDF of Compressed Signal-----%
function PDFvoice_sComp = PDF_CompressedSignal(voice_sComp,xRange)
HISTvoice_sComp = hist(voice_sComp,xRange);
PDFvoice_sComp = HISTvoice_sComp./length(voice_sComp);

%-----Signal Power-----%
function P_signal = PowerSignal(voice_s)
for ii=1:length(voice_s)
    P_s(ii) = voice_s(ii)^2;
end
P_signal = (1/length(voice_s))*sum(P_s);

%-----Compressed Signal Power-----%
function P_CompSignal = PowerCompressedSignal(voice_sComp)
for ii=1:length(voice_sComp)
    P_cs(ii) = voice_sComp(ii)^2;
end
P_CompSignal = (1/length(voice_sComp))*sum(P_cs);

%-----Power of Uniform Quantization Noise-----%
function P_noiseUnif = PowerNoiseUnif(voice_s,quantized_sUnif)
for ii = 1:length(voice_s)
    P_nUnif(ii) = (voice_s(ii)-quantized_sUnif(ii))^2;
end
P_noiseUnif = (1/length(voice_s))*sum(P_nUnif);

%-----Power of Non-uniform Quantization Noise-----%
function [P_noiseNonUnif] =
PowerNoiseNonUnif(voice_sComp,quantized_sNonUnif)
for ii = 1:length(voice_sComp)
    P_nNonUnif(ii) = (voice_sComp(ii)-quantized_sNonUnif(ii))^2;
end
P_noiseNonUnif = (1/length(voice_sComp))*sum(P_nNonUnif);

%-----Power of Compression-Expansion Noise-----%
function P_noiseCompExp = PowerNoiseCompExp(voice_s,quantized_sExp)
for ii = 1:length(voice_s)
    P_nCompExp(ii) = (voice_s(ii)-quantized_sExp(ii))^2;
end
```

```

P_noiseCompExp = (1/length(voice_s))*sum(P_nCompExp);

%-----Uniform Quantization-----%
function quantized_sUnif = UniformQuantization(voice_s,...
    quantization_levels,boundary_levels)
for ii = 1:length(voice_s)
    for jj = 1:length(quantization_levels)
        if (voice_s(ii)<boundary_levels(1))
            quantized_sUnif(ii) = quantization_levels(1);
        end
        if (voice_s(ii)>=boundary_levels(jj))
            if (voice_s(ii)<boundary_levels(jj+1))
                quantized_sUnif(ii) = quantization_levels(jj);
            end
        end
        if (voice_s(ii)>=boundary_levels(end))
            quantized_sUnif(ii) = quantization_levels(end);
        end
    end
end

%-----Non-uniform Quantization-----%
function quantized_sNonUnif = NonUniformQuantization(voice_sComp,...
    quantization_levels,boundary_levels)
for ii=1:length(voice_sComp)
    for jj = 1:length(quantization_levels)
        if (voice_sComp(ii)<boundary_levels(1))
            quantized_sNonUnif(ii) = quantization_levels(1);
        end
        if (voice_sComp(ii)>=boundary_levels(jj))
            if (voice_sComp(ii)<boundary_levels(jj+1))
                quantized_sNonUnif(ii) = quantization_levels(jj);
            end
        end
        if (voice_sComp(ii)>=boundary_levels(end))
            quantized_sNonUnif(ii) = quantization_levels(end);
        end
    end
end
end

```

## ส่วนของ Script

```

%-----GUI of Type of Quantization-----%
function varargout = Type_of_Quantization(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Type_of_Quantization_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Type_of_Quantization_OutputFcn, ...
                  ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Type_of_Quantization_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = Type_of_Quantization_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function ExitProgram_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(gcf);

function UnifQ_Callback(hObject, eventdata, handles)
Uniform Quantization;
close(gcf);

function NonunifQ_Callback(hObject, eventdata, handles)
Non uniform Quantization;
close(gcf);

%-----GUI of Uniform Quantization-----%
function varargout = Uniform_Quantization(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',      mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Uniform_Quantization_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Uniform_Quantization_OutputFcn, ...
                  ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});

```

```

else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Uniform_Quantization_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = Uniform_Quantization_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function RunUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ~isempty(get(handles.nbitsUnif, 'String')) &&
~isempty(get(handles.ShowFilenameUnif, 'String'))
    n = str2num(get(handles.nbitsUnif, 'String'));
    handles.n = n;
    guidata(hObject, handles);
    M = 2^n;
    Amin = -1;
    Amax = 1;
    step_size = (2*Amax)/M;
    boundary_levels = Amin:step_size:Amax;
    quantization_levels = Amin+(step_size/2):step_size:Amax-
(step_size/2);
    voice_s = handles.voice_s;
    fs = handles.fs;

    [quantized_sUnif] =
UniformQuantization(voice_s, quantization_levels, boundary_levels);

    [P_signal] = PowerSignal(voice_s);
    [P_noiseUnif] = PowerNoiseUnif(voice_s, quantized_sUnif);
    SNRUnif = 10*log10(P_signal/P_noiseUnif);

    set(handles.PsignalUnif, 'String', num2str(P_signal));
    set(handles.PnoiseUnif, 'String', num2str(P_noiseUnif));
    set(handles.SQNR_Unif, 'String', num2str(SNRUnif));
    handles.quantized_sUnif = quantized_sUnif;
    guidata(hObject, handles);
end
if isempty(get(handles.nbitsUnif, 'String')) ||
isempty(get(handles.ShowFilenameUnif, 'String'))
    warndlg('Please fill out all data fields.')
end

function nbitsUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)

function nbitsUnif_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function MenuUnif1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuUnif1_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
[filename, path] = uigetfile('*.wav');
if filename ~= 0

```



```

        [voice_s, fs] = wavread([path filename]);
        voice_s = voice_s';
        handles.voice_s = voice_s;
        handles.fs = fs;
        guidata(hObject,handles);
        set(handles.ShowFilenameUnif,'String',filename);
    end

function SubMenuUnif1_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Index;
close(gcf);

function MenuUnif2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuUnif2_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ~isempty(handles.voice_s)
    figure('Name','Voice Signal','NumberTitle','off');
    plot(handles.voice_s);
    title('Voice Signal');
    xlabel('Number of Sample');
    ylabel('Magnitude');
    axis([0 (length(handles.voice_s)-1) -1 1]);
end

function SubMenuUnif2_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
figure('Name','Uniform Quantized Signal','NumberTitle','off');
plot(handles.quantized_sUnif);
title('Uniform Quantized Signal');
xlabel('Number of Sample');
ylabel('Magnitude');
axis([0 (length(handles.quantized_sUnif)-1) -1 1]);

function MenuUnif3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuUnif3_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Amin = -1;
Amax = 1;
xRange = Amin:2/(2^8):Amax;
voice_s = handles.voice_s;
[PDFvoice_s] = PDF_VoiceSignal(voice_s,xRange);
figure('Name','PDF of Voice Signal','NumberTitle','off');
plot(xRange,PDFvoice_s);
title('PDF of Voice Signal');
xlabel('Magnitude');
ylabel('f_X(x)');

function MenuUnif4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuUnif4_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
wavplay(handles.voice_s);

function SubMenuUnif4_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
wavplay(handles.quantized_sUnif);

function ResetUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.ShowFilenameUnif,'String','');
set(handles.nbitsUnif,'String','');
set(handles.PsignalUnif,'String','');
set(handles.PnoiseUnif,'String','');
set(handles.SQNR_Unif,'String','');

```

```

function BackUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)
Type_of_Quantization;

%-----GUI of Non-uniform Quantization-----%
function varargout = Non_uniform_Quantization(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',           mfilename, ...
                  'gui_Singleton',      gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',     'gui_OpeningFcn', ...
                  @Non_uniform_Quantization_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',      'gui_OutputFcn', ...
                  @Non_uniform_Quantization_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',      [], ...
                  'gui_Callback',       []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function Non_uniform_Quantization_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = Non_uniform_Quantization_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function MenuNonUnif1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuNonUnif1_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
[filename, path] = uigetfile('*.wav');
if filename ~= 0
    [voice_s, fs] = wavread([path filename]);
    voice_s = voice_s';
    handles.voice_s = voice_s;
    handles.fs = fs;
    guidata(hObject, handles);
    set(handles.ShowFilenameNonUnif, 'String', filename);
end

function SubMenuNonUnif1_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Index;
close(gcf);

function MenuNonUnif2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function SubMenuNonUnif2_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ~isempty(handles.voice_s)
    figure('Name', 'Voice Signal', 'NumberTitle', 'off');
    plot(handles.voice_s);
    title('Voice Signal');
    xlabel('Number of Sample');

```

```

        ylabel('Magnitude');
        axis([0 (length(handles.voice_s)-1) -1 1]);
    end

    function SubMenuNonUnif2_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    figure('Name','Compressed Signal','NumberTitle','off');
    plot(handles.voice_sComp);
    title('Compressed Signal');
    xlabel('Number of Sample');
    ylabel('Magnitude');
    axis([0 (length(handles.voice_sComp)-1) -1 1]);

    function SubMenuNonUnif2_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
    figure('Name','Non-uniform Quantized Signal','NumberTitle','off');
    plot(handles.quantized_sExp);
    title('Non-uniform Quantized Signal');
    xlabel('Number of Sample');
    ylabel('Magnitude');
    axis([0 (length(handles.quantized_sExp)-1) -1 1]);

    function MenuNonUnif3_Callback(hObject, eventdata, handles)

    function SubMenuNonUnif3_1_Callback(hObject, eventdata, handles)

    voice_s = handles.voice_s;
    xRange = handles.xRange;
    [PDFvoice_s] = PDF_VoiceSignal(voice_s,xRange);
    figure('Name','PDF of Voice Signal','NumberTitle','off');
    plot(xRange,PDFvoice_s);
    title('PDF of Voice Signal');
    xlabel('Magnitude');
    ylabel('f_X(x)');

    function SubMenuNonUnif3_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    figure('Name','PDF of Compressed Signal','NumberTitle','off');
    plot(handles.xRange,handles.PDFvoice_sComp);
    title('PDF of Compressed Signal');
    xlabel('Magnitude');
    ylabel('f_X(x)');

    function MenuNonUnif4_Callback(hObject, eventdata, handles)

    function SubMenuNonUnif4_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    wavplay(handles.voice_s);

    function SubMenuNonUnif4_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
    wavplay(handles.quantized_sExp);

    function MenuNonUnif5_Callback(hObject, eventdata, handles)

    function SubMenuNonUnif5_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
    figure('Name','u-law Characteristic','NumberTitle','off');
    scatter(handles.voice_s,handles.voice_sComp, '.');
    title(['\mu-law Characteristic (\mu = '
    get(handles.uNonUnif,'String') ' ']);
    xlabel('Input w_{1}(t)');
    ylabel('Output w_{2}(t)');

    function RunNonUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ~isempty(get(handles.nbitsNonUnif,'String')) &&
~isempty(get(handles.ShowFilenameNonUnif,'String')) &&
~isempty(get(handles.uNonUnif,'String'))
    n = str2num(get(handles.nbitsNonUnif,'String'));
    handles.n = n;
    Mu = str2num(get(handles.uNonUnif,'String'));
    handles.Mu = Mu;
    guidata(hObject,handles);
    M = 2^n;
    Amin = -1;
    Amax = 1;
    xRange = Amin:2/(2^8):Amax;
    step_size = (2*Amax)/M;
    boundary_levels = Amin:step_size:Amax;
    quantization_levels = Amin+(step_size/2):step_size:Amax-
(step_size/2);

    voice_s = handles.voice_s;
    fs = handles.fs;

    [voice_sComp] = CompressedSignal(voice_s,Mu);
    [PDFvoice_sComp] = PDF_CompressedSignal(voice_sComp,xRange);

    [quantized_sNonUnif] = NonUniformQuantization(voice_sComp,...
        quantization_levels,boundary_levels);
    [quantized_sExp] = ExpandedSignal(quantized_sNonUnif,Mu);

    [P_CompSignal] = PowerCompressedSignal(voice_sComp);
    [P_noiseNonUnif] =
PowerNoiseNonUnif(voice_sComp,quantized_sNonUnif);
    [P_signal] = PowerSignal(voice_s);
    [P_noiseCompExp] = PowerNoiseCompExp(voice_s,quantized_sExp);
    SQNRNonUnif = 10*log10(P_CompSignal/P_noiseNonUnif);
    SNRNonUnif = 10*log10(P_signal/P_noiseCompExp);

    set(handles.PsignalNonUnif,'String',num2str(P_CompSignal));
    set(handles.PnoiseNonUnif,'String',num2str(P_noiseNonUnif));
    set(handles.SQNR_NonUnif,'String',num2str(SQNRNonUnif));
    set(handles.SNR_NonUnif,'String',num2str(SNRNonUnif));

    handles.voice_sComp = voice_sComp;
    handles.PDFvoice_sComp = PDFvoice_sComp;
    handles.quantized_sExp = quantized_sExp;
    handles.xRange = xRange;
    guidata(hObject,handles);
end
if isempty(get(handles.nbitsNonUnif,'String')) ||
isempty(get(handles.ShowFilenameNonUnif,'String')) ||
isempty(get(handles.uNonUnif,'String'))
    warndlg('Please fill out all data fields.')
end

function ResetNonUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.ShowFilenameNonUnif,'String','');
set(handles.nbitsNonUnif,'String','');
set(handles.uNonUnif,'String','');
set(handles.PsignalNonUnif,'String','');
set(handles.PnoiseNonUnif,'String','');
set(handles.SQNR_NonUnif,'String','');

```

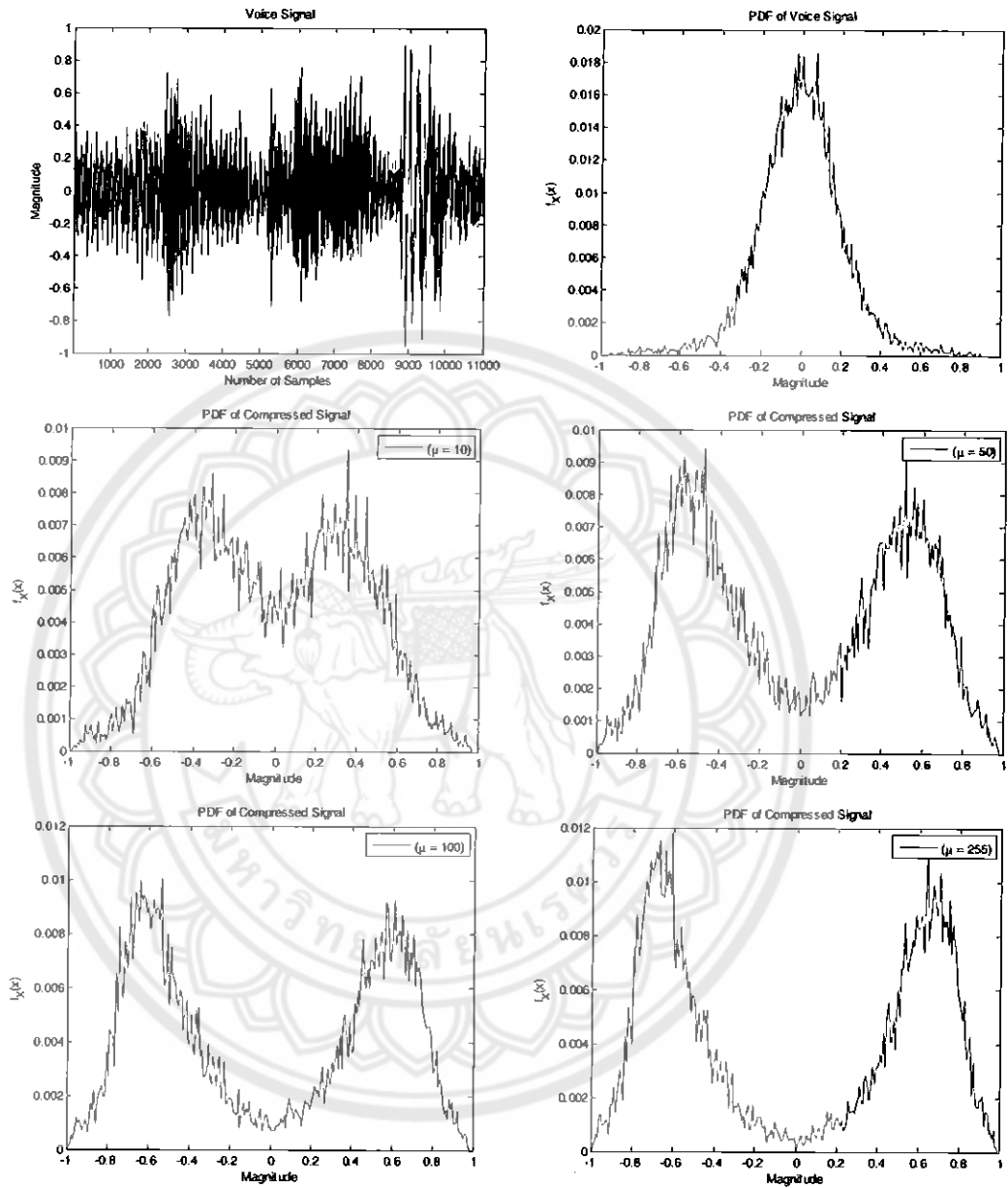
```
)  
function BackNonUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)  
Type_of_Quantization;  
  
function nbitsNonUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function nbitsNonUnif_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
  
function uNonUnif_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function uNonUnif_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),  
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
end
```





ภาคผนวก ง  
ผลการทดสอบค่า SNR จากโปรแกรม

## ผลการทดสอบค่า SQNR จากโปรแกรม



รูปที่ 1ง รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 1 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0467 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.1629 \text{ W}$$

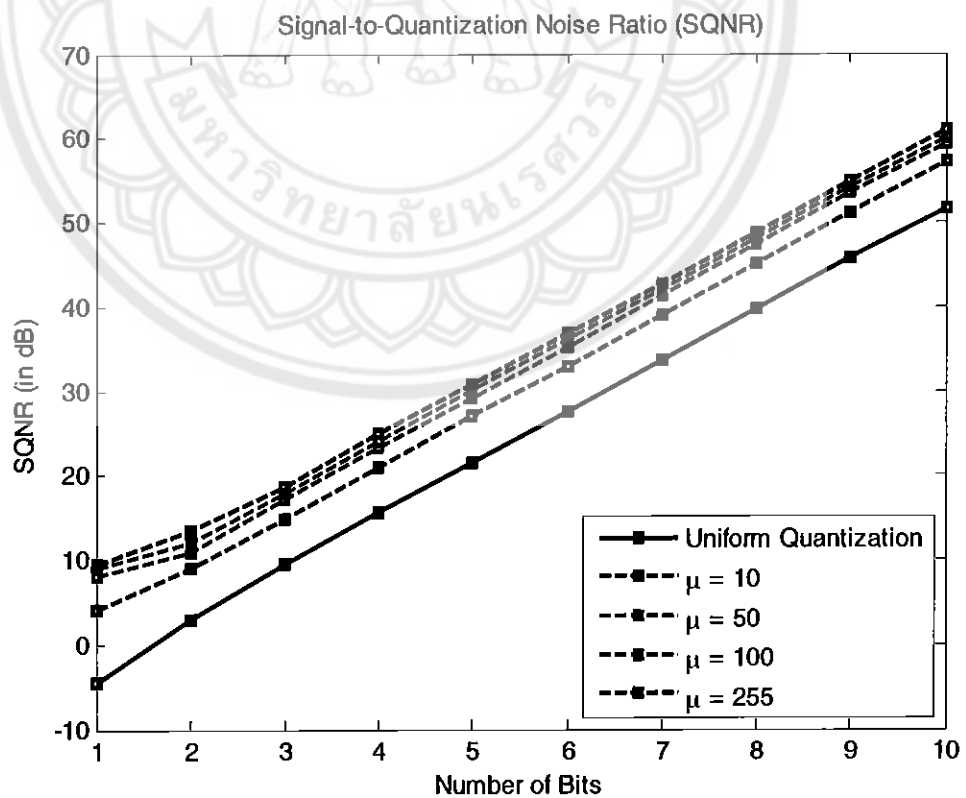
$$P_{signal, \mu=50} = 0.2778 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.3295 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.3951 \text{ W}$$

ตารางที่ 1ง SQNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.6126	4.1163	8.2422	9.1463	9.5778
2	4	3.0358	8.9516	11.0364	12.0547	13.4806
3	8	9.5398	14.9846	17.3081	18.0167	18.7715
4	16	15.5185	21.0122	23.3113	24.0228	24.8701
5	32	21.5084	27.0520	29.2781	30.0323	30.8327
6	64	27.5562	33.0131	35.3490	36.1251	36.8746
7	128	33.6167	39.1030	41.3356	42.1571	42.8470
8	256	39.6233	45.0981	47.3937	48.2165	48.9231
9	512	45.6874	51.1250	53.4319	54.2007	54.9020
10	1024	51.7115	57.1530	59.3744	60.1690	60.9448

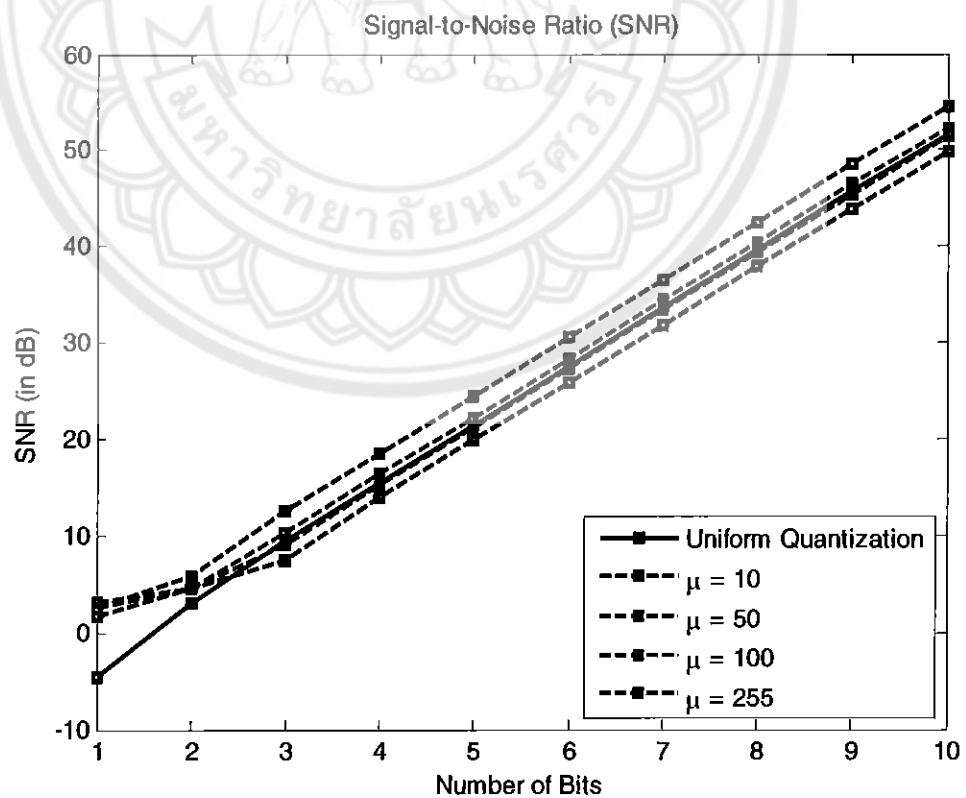


รูปที่ 2ง SQNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที

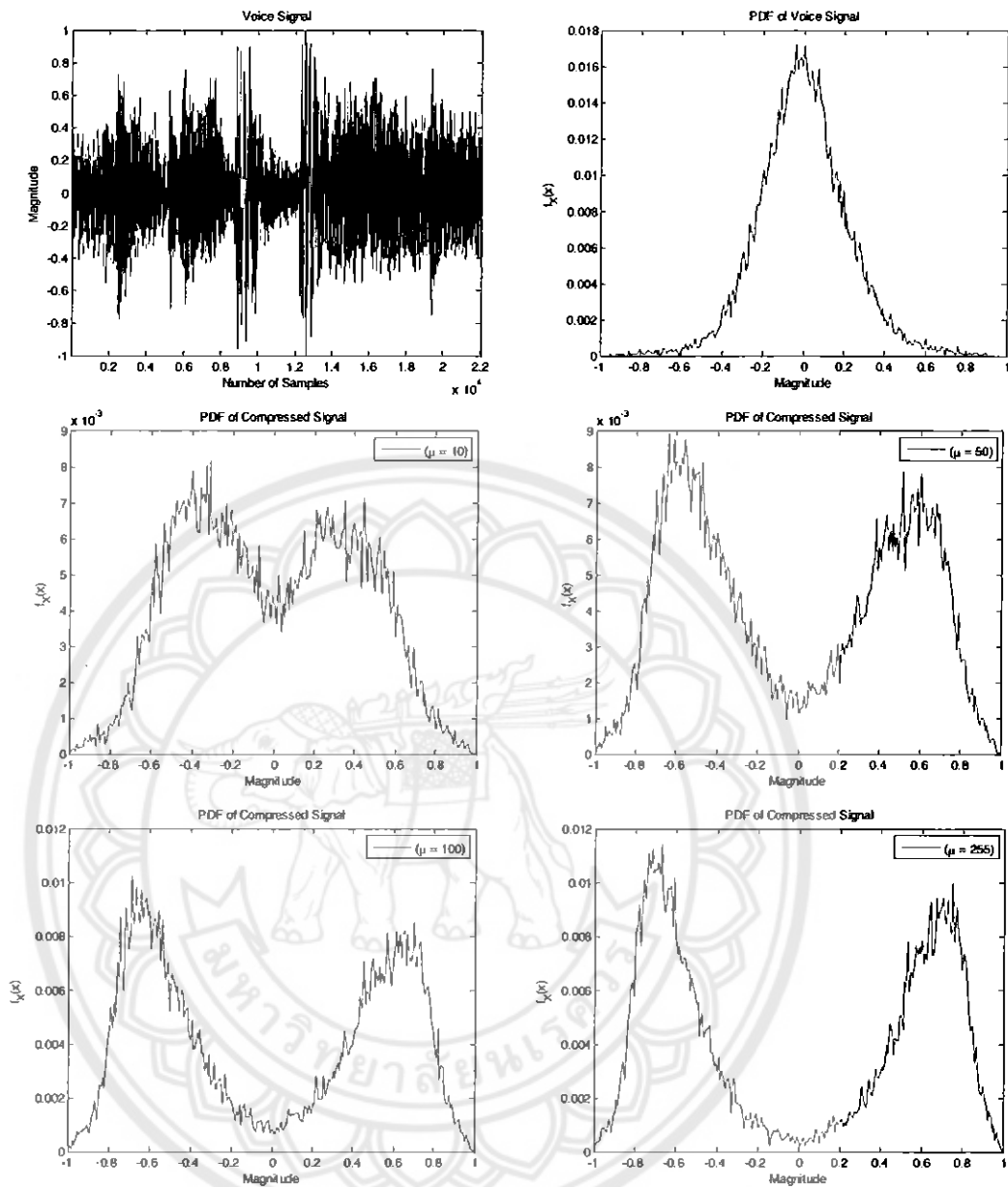


ตารางที่ 2ง SNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.6126	2.6361	3.2573	2.6078	1.7611
2	4	3.0358	5.8820	4.6940	4.6222	4.6236
3	8	9.5398	12.5426	10.3722	9.1107	7.4620
4	16	15.5185	18.5507	16.4707	15.3466	14.0205
5	32	21.5084	24.5236	22.3049	21.2841	19.9380
6	64	27.5562	30.5798	28.3705	27.3325	25.8618
7	128	33.6167	36.5796	34.4469	33.4222	31.8550
8	256	39.6233	42.5699	40.5078	39.4876	37.9112
9	512	45.6874	48.6177	46.5571	45.4536	43.9020
10	1024	51.7115	54.5832	52.4226	51.4254	49.9335



รูปที่ 3ง SNR เสียงเพลงขนาด 1 วินาที



รูปที่ 4 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 2 วินาที

#### กำลังของสัญญาณ

$$P_{\text{signal}} = 0.0501 \text{ W}$$

$$P_{\text{signal}, \mu=10} = 0.1730 \text{ W}$$

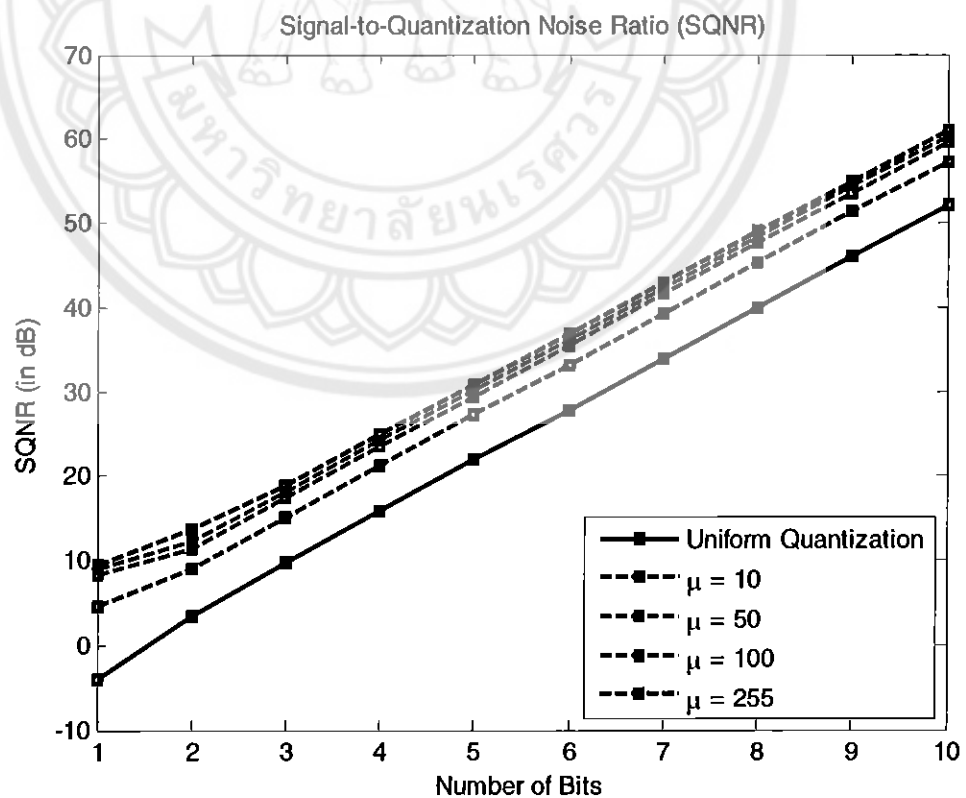
$$P_{\text{signal}, \mu=50} = 0.2898 \text{ W}$$

$$P_{\text{signal}, \mu=100} = 0.3415 \text{ W}$$

$$P_{\text{signal}, \mu=255} = 0.4067 \text{ W}$$

ตารางที่ 3ง SQNR เสียงเพลงขนาด 2 วินาที

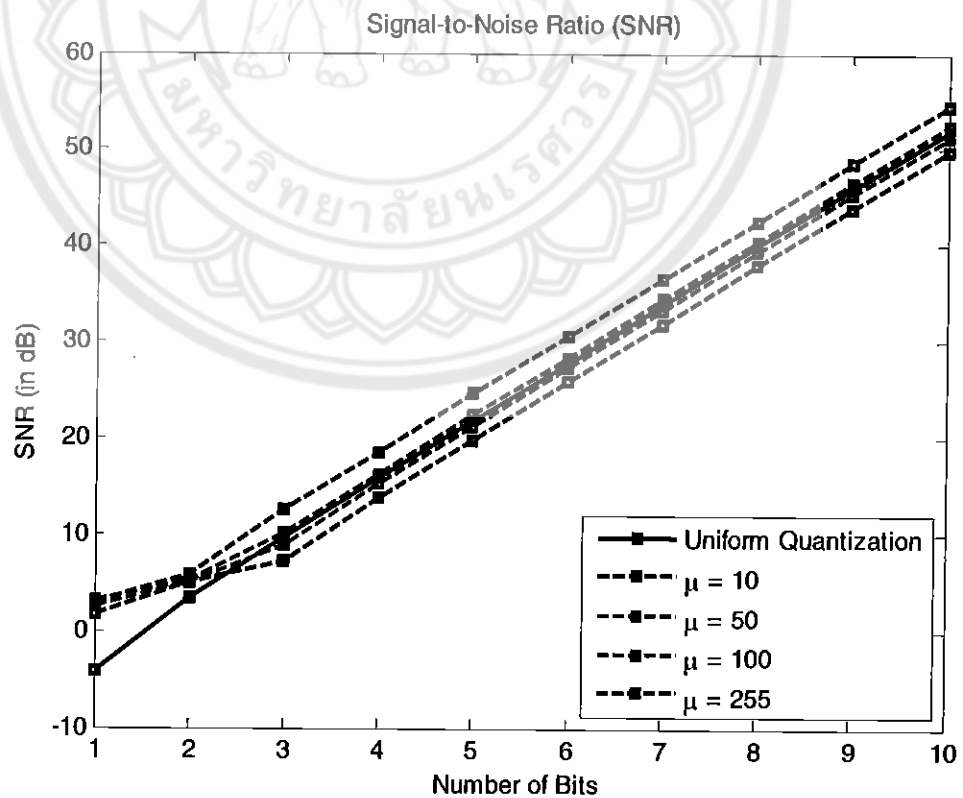
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.1453	4.5239	8.3528	9.1374	9.4792
2	4	3.4308	9.1359	11.4542	12.4396	13.7669
3	8	9.7851	15.2256	17.4892	18.1061	18.7940
4	16	15.8695	21.2461	23.4736	24.1799	25.0031
5	32	21.8372	27.3113	29.4746	30.1985	30.9293
6	64	27.8652	33.2660	35.5172	36.2326	36.9828
7	128	33.9383	39.3156	41.5503	42.2823	42.9856
8	256	39.9640	45.3221	47.5872	48.3301	49.0481
9	512	45.9626	51.3819	53.6205	54.3449	55.0112
10	1024	52.0058	57.3632	59.5884	60.3083	61.0530



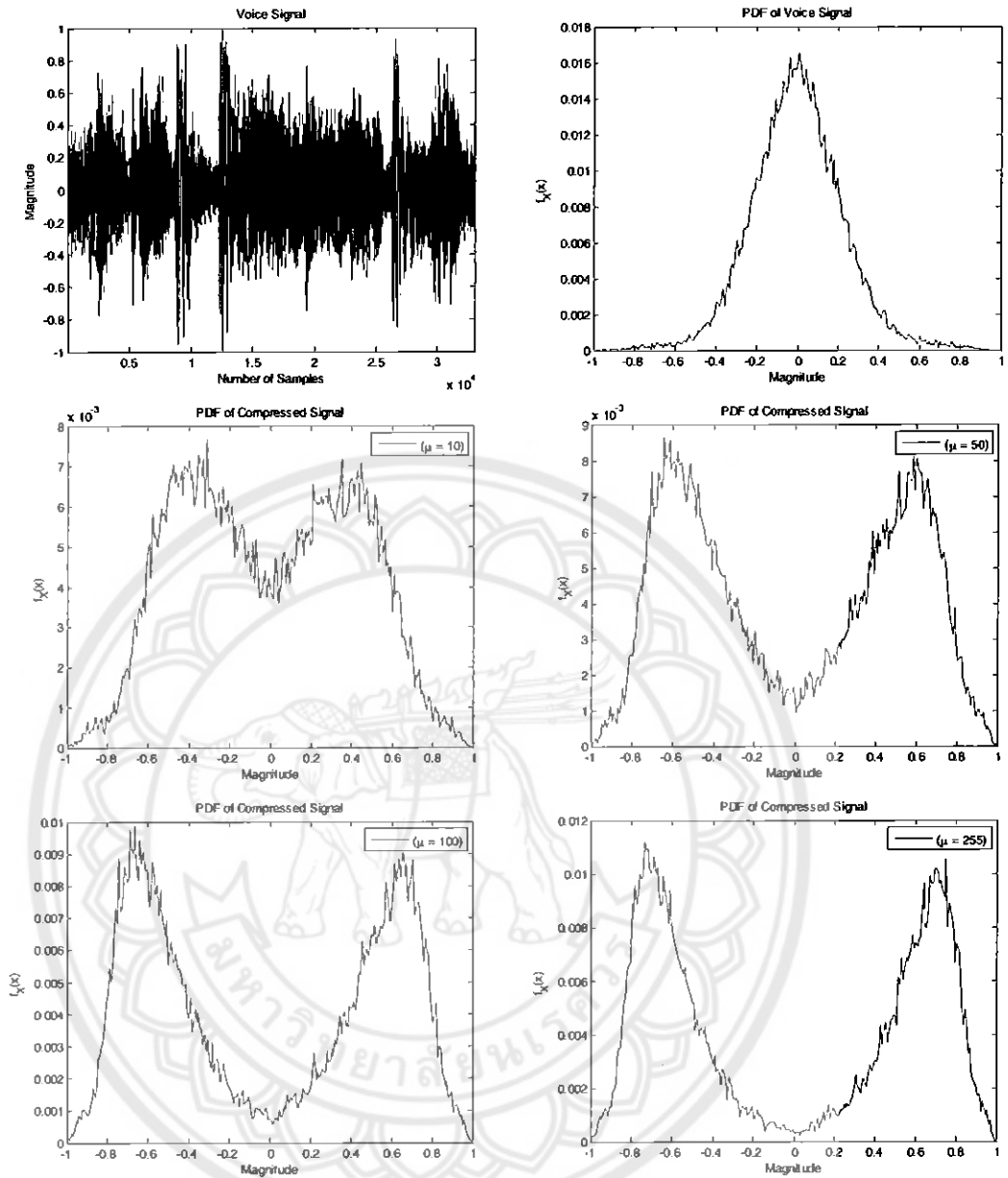
รูปที่ 5ง SQNR เสียงเพลงขนาด 2 วินาที

ตารางที่ 4ง SNR เสียงเพลงขนาด 2 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.1453	3.0143	3.2986	2.5999	1.7390
2	4	3.4308	5.8800	5.1468	5.1045	4.9827
3	8	9.7851	12.5535	10.1549	8.8625	7.3895
4	16	15.8695	18.5231	16.4001	15.2835	13.9365
5	32	21.8372	24.5979	22.3698	21.2791	19.8404
6	64	27.8652	30.5740	28.4183	27.2754	25.8954
7	128	33.9383	36.5523	34.4294	33.3862	31.8804
8	256	39.9640	42.5645	40.4233	39.3841	37.9310
9	512	45.9626	48.6498	46.5715	45.3775	43.8361
10	1024	52.0058	54.5943	52.4504	51.3538	49.9082



รูปที่ 6ง SNR เสียงเพลงขนาด 2 วินาที



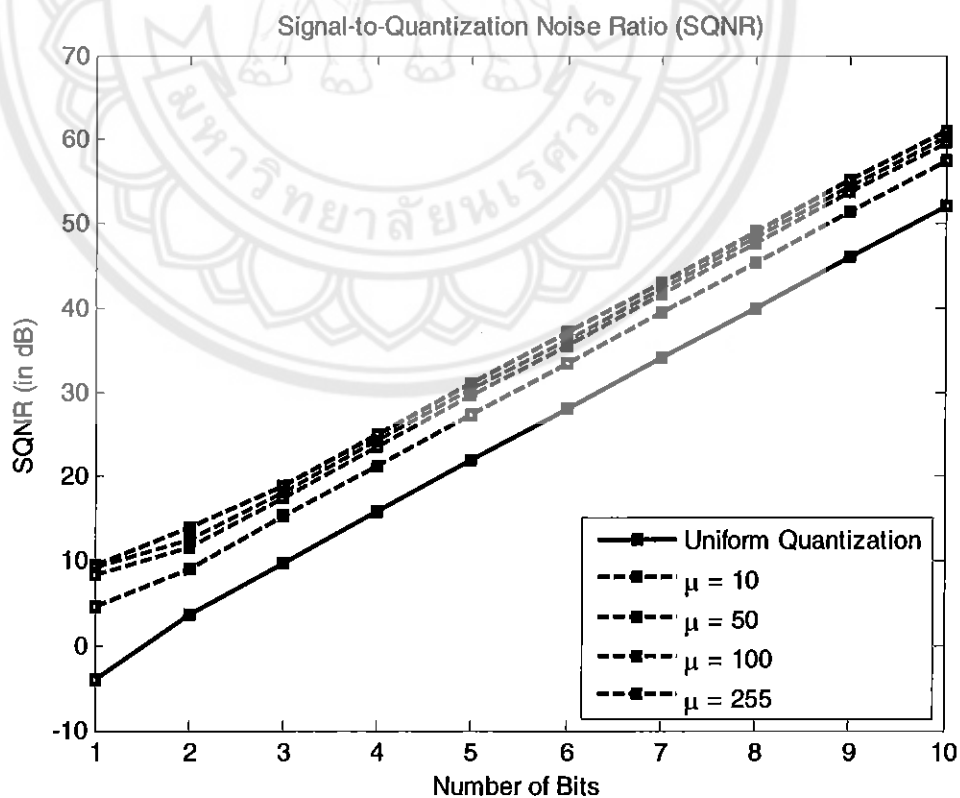
รูปที่ 7ง รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 3 วินาที

กำลังของสัญญาณ

- $P_{signal} = 0.0508 \text{ W}$
- $P_{signal, \mu=10} = 0.1762 \text{ W}$
- $P_{signal, \mu=50} = 0.2942 \text{ W}$
- $P_{signal, \mu=100} = 0.3462 \text{ W}$
- $P_{signal, \mu=255} = 0.4114 \text{ W}$

ตารางที่ 5ง SQNR เสียงเพลงขนาด 3 วินาที

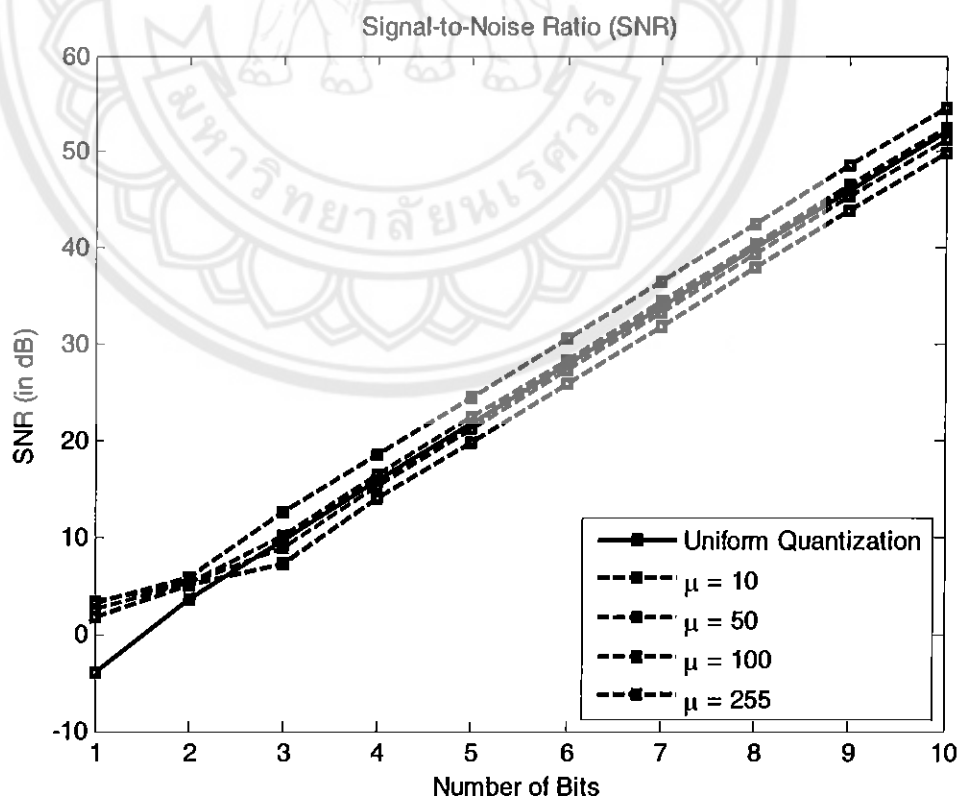
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.0216	4.7128	8.4540	9.1853	9.4775
2	4	3.5872	9.1472	11.5404	12.5808	13.9457
3	8	9.8390	15.3187	17.5590	18.1760	18.8282
4	16	15.9300	21.3192	23.5412	24.2574	25.0695
5	32	21.9152	27.3654	29.5542	30.2567	30.9990
6	64	27.9487	33.3480	35.5807	36.2969	37.0401
7	128	33.9957	39.3620	41.6081	42.3293	43.0459
8	256	40.0088	45.4012	47.6403	48.3848	49.0964
9	512	46.0254	51.4415	53.6735	54.3971	55.0587
10	1024	52.0671	57.4543	59.6771	60.3664	61.1023



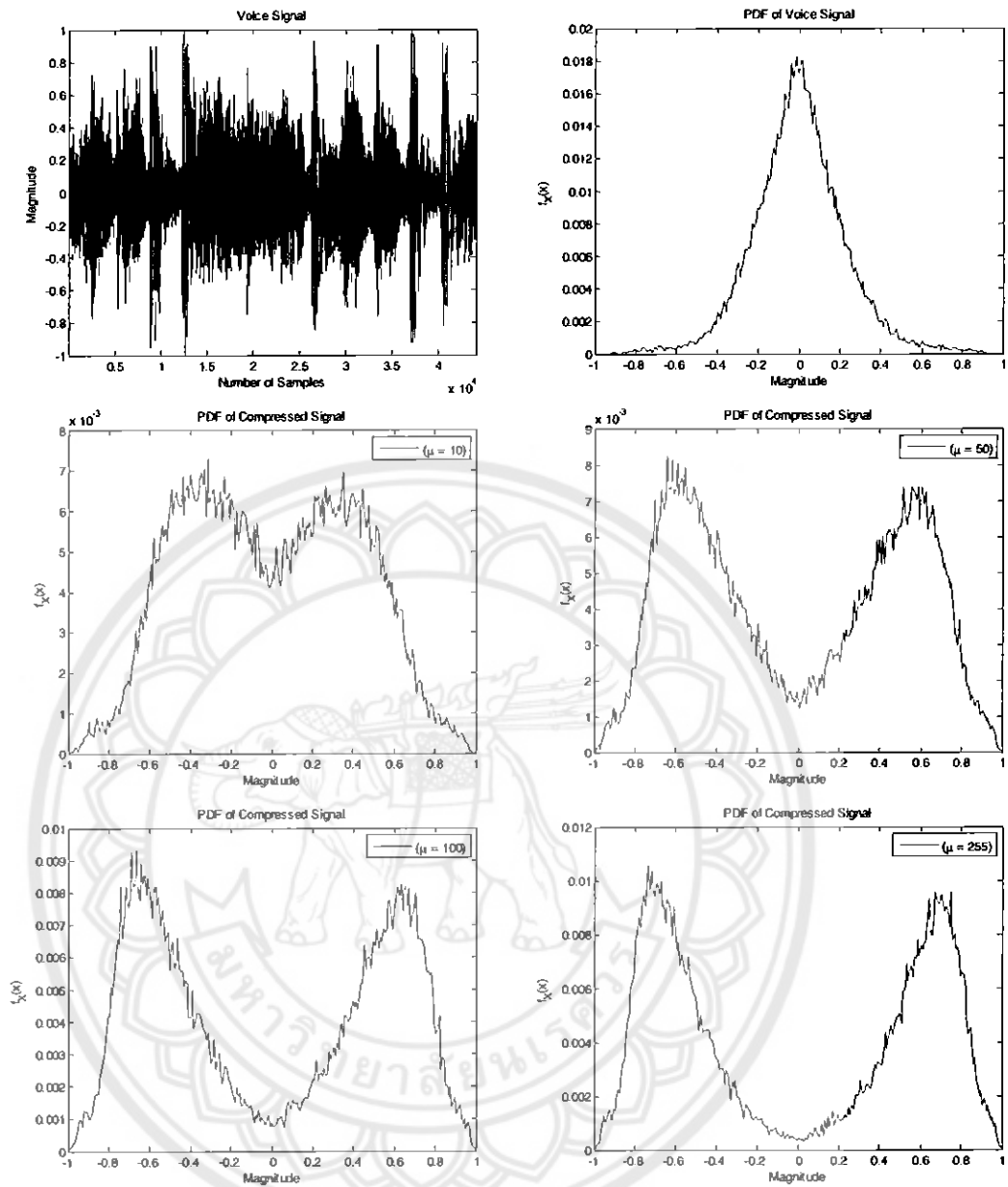
รูปที่ 8ง SQNR เสียงเพลงขนาด 3 วินาที

ตารางที่ 6ง SNR เสียงเพลงขนาด 3 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.0216	3.1638	3.3484	2.6247	1.7490
2	4	3.5872	5.8312	5.1664	5.1837	5.1190
3	8	9.8390	12.6009	10.1626	8.8329	7.3793
4	16	15.9300	18.5082	16.4259	15.3756	14.0277
5	32	21.9152	24.5738	22.3641	21.2280	19.8428
6	64	27.9487	30.6044	28.3974	27.2939	25.8918
7	128	33.9957	36.5597	34.4458	33.3691	31.9074
8	256	40.0088	42.5959	40.4275	39.3937	37.9418
9	512	46.0254	48.6482	46.5652	45.3805	43.8486
10	1024	52.0671	54.6161	52.4939	51.3769	49.9552



รูปที่ 9ง SNR เสียงเพลงขนาด 3 วินาที



รูปที่ 10ง รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 4 วินาที

### กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0508 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.1716 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=50} = 0.2863 \text{ W}$$

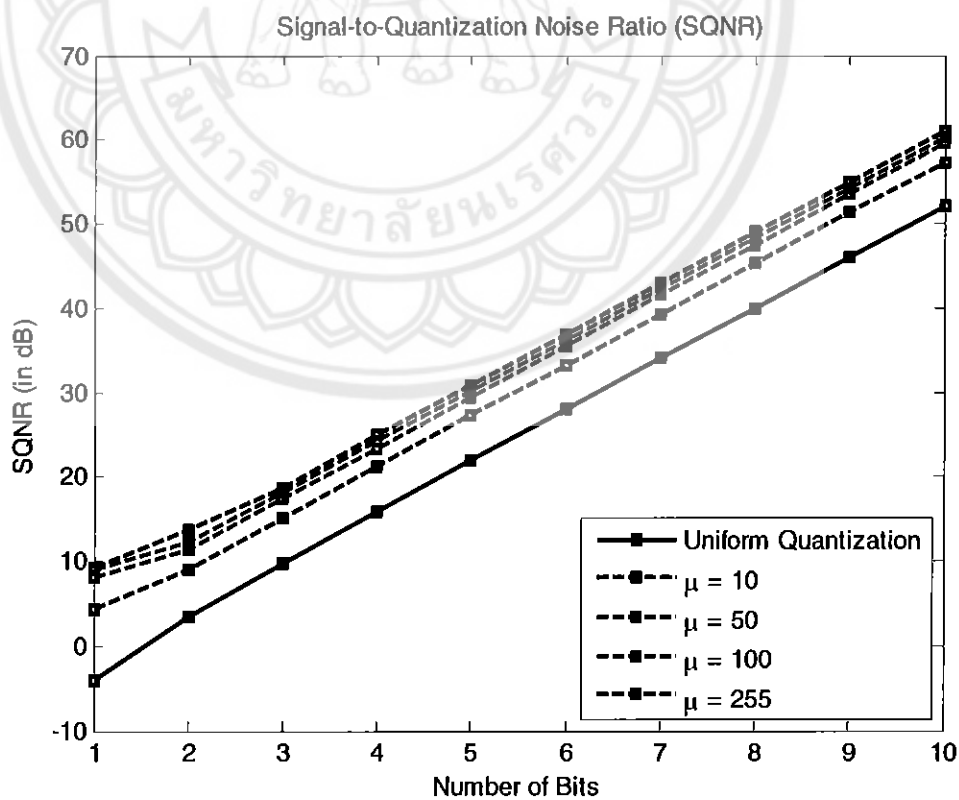
$$P_{signal, \mu=100} = 0.3374 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.4022 \text{ W}$$



ตารางที่ 7ง SQNR เสียงเพลงขนาด 4 วินาที

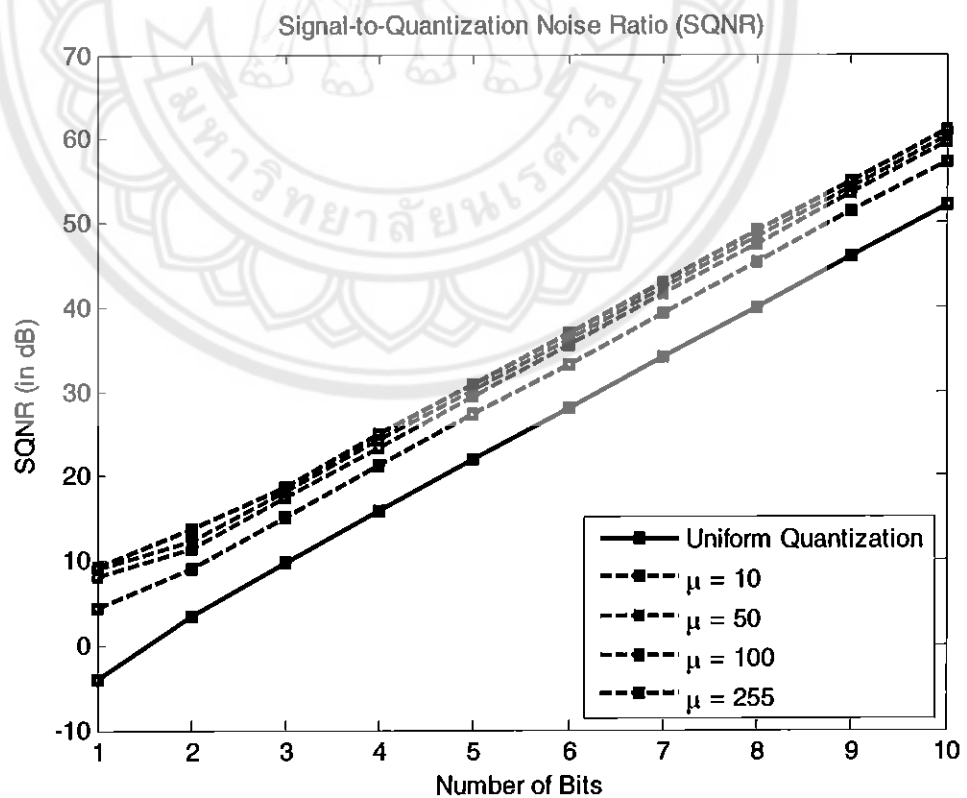
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.1470	4.2965	8.1248	8.9694	9.3976
2	4	3.3837	9.0929	11.4256	12.4014	13.6756
3	8	9.7803	15.2313	17.4391	18.0812	18.7660
4	16	15.9138	21.2038	23.4214	24.1615	24.9669
5	32	21.9247	27.2460	29.4436	30.1559	30.9058
6	64	27.9577	33.2317	35.4688	36.1770	36.9338
7	128	33.9856	39.2535	41.4987	42.2018	42.9609
8	256	40.0206	45.2877	47.5133	48.2598	48.9903
9	512	46.0209	51.3260	53.5372	54.2673	54.9721
10	1024	52.0687	57.3357	59.5443	60.2546	61.0081



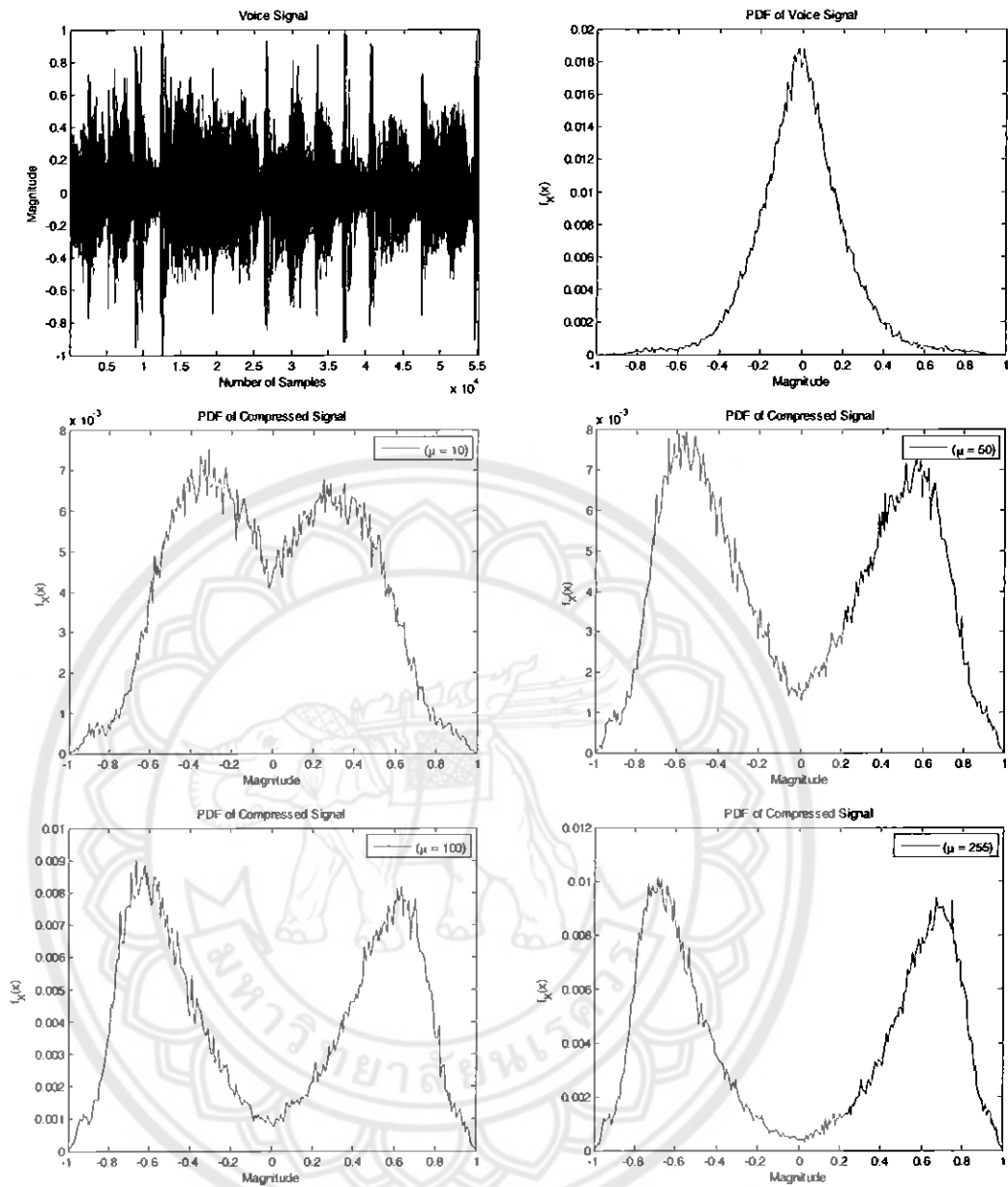
รูปที่ 11ง SQNR เสียงเพลงขนาด 4 วินาที

ตารางที่ 8ง SNR เสียงเพลงขนาด 4 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.1470	4.2965	8.1248	8.9694	9.3976
2	4	3.3837	9.0929	11.4256	12.4014	13.6756
3	8	9.7803	15.2313	17.4391	18.0812	18.7660
4	16	15.9138	21.2038	23.4214	24.1615	24.9669
5	32	21.9247	27.2460	29.4436	30.1559	30.9058
6	64	27.9577	33.2317	35.4688	36.1770	36.9338
7	128	33.9856	39.2535	41.4987	42.2018	42.9609
8	256	40.0206	45.2877	47.5133	48.2598	48.9903
9	512	46.0209	51.3260	53.5372	54.2673	54.9721
10	1024	52.0687	57.3357	59.5443	60.2546	61.0081



รูปที่ 12ง SNR เสียงเพลงขนาด 4 วินาที



รูปที่ 13 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 5 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0476 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.1640 \text{ W}$$

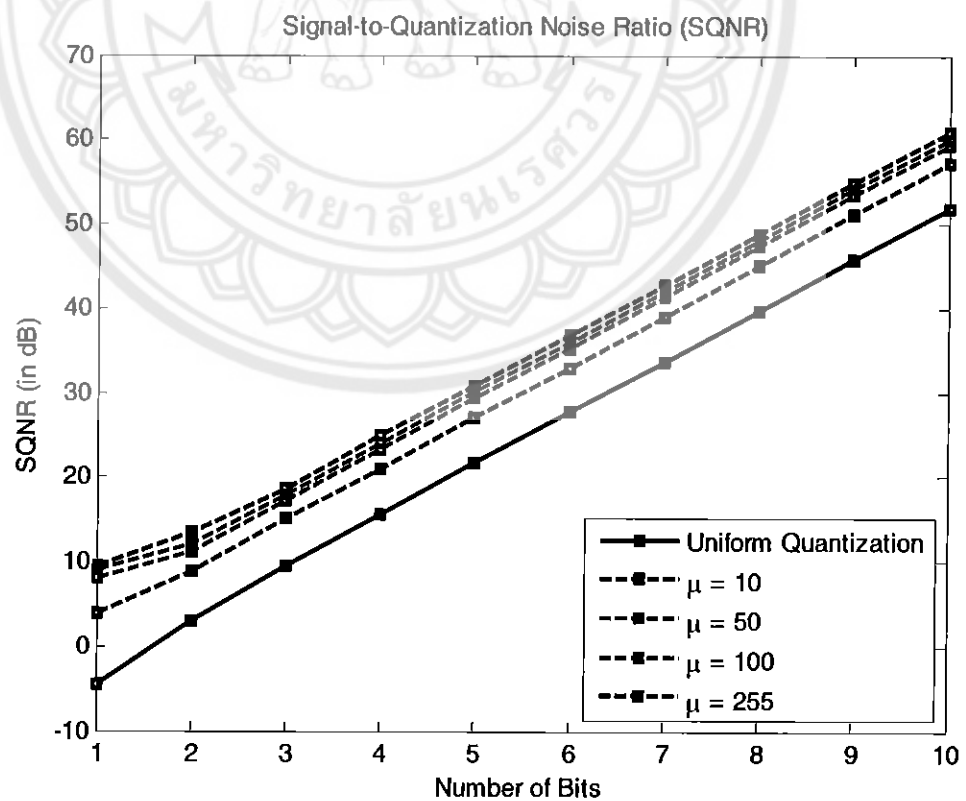
$$P_{signal, \mu=50} = 0.2774 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.3285 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.3935 \text{ W}$$

ตารางที่ 9ง SQNR เสียงเพลงขนาด 5 วินาที

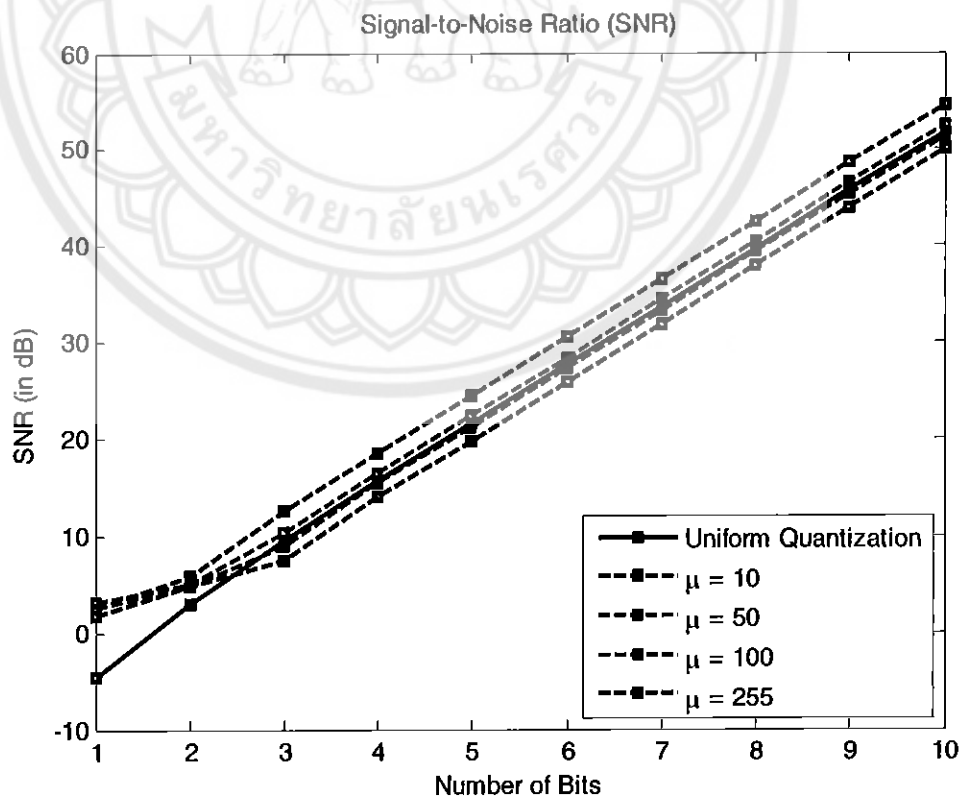
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.5346	4.0005	8.0337	8.9676	9.4678
2	4	3.0163	8.9450	11.2175	12.1783	13.4722
3	8	9.5025	15.0326	17.3002	17.9675	18.6899
4	16	15.6269	21.0048	23.3052	24.0264	24.8569
5	32	21.6480	27.0565	29.3121	30.0343	30.7947
6	64	27.6790	33.0395	35.3297	36.0643	36.8345
7	128	33.6998	39.0562	41.3514	42.0855	42.8623
8	256	39.7303	45.0896	47.3815	48.1373	48.8908
9	512	45.7337	51.1275	53.4035	54.1454	54.8732
10	1024	51.7795	57.1404	59.4092	60.1306	60.9157



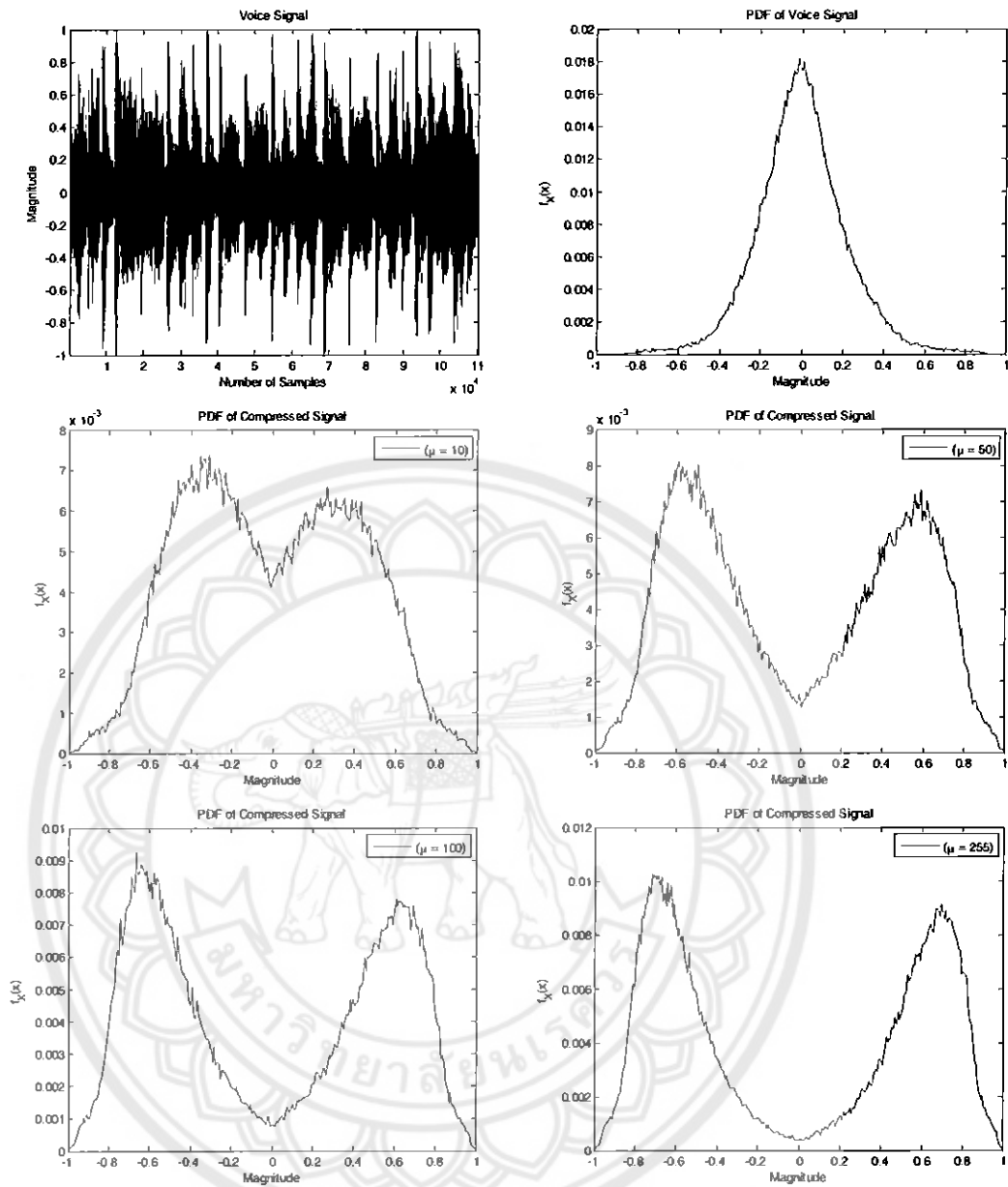
รูปที่ 14ง SQNR เสียงเพลงขนาด 5 วินาที

ตารางที่ 10ง SNR เสียงเพลงขนาด 5 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.5346	2.6157	3.1930	2.5572	1.7288
2	4	3.0163	5.9014	4.9733	4.8567	4.7464
3	8	9.5025	12.5952	10.2712	8.9654	7.4769
4	16	15.6269	18.4579	16.4741	15.4246	14.0824
5	32	21.6480	24.5399	22.3892	21.2305	19.8278
6	64	27.6790	30.5550	28.3833	27.2733	25.8747
7	128	33.6998	36.5674	34.4558	33.3278	31.9008
8	256	39.7303	42.5737	40.4573	39.3653	37.9351
9	512	45.7337	48.6092	46.5674	45.3532	43.8971
10	1024	51.7795	54.5983	52.5178	51.3592	49.9757



รูปที่ 15ง SNR เสียงเพลงขนาด 5 วินาที



รูปที่ 16 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 10 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0480 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.1669 \text{ W}$$

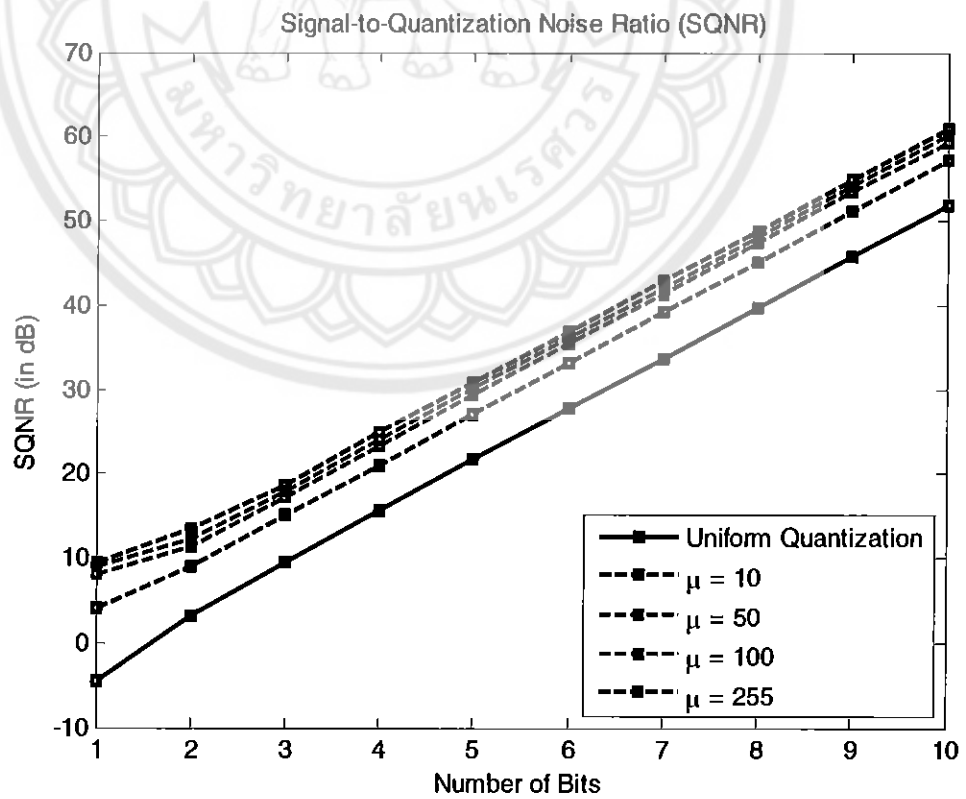
$$P_{signal, \mu=50} = 0.2814 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.3327 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.3978 \text{ W}$$

ตารางที่ 11ง SQNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที

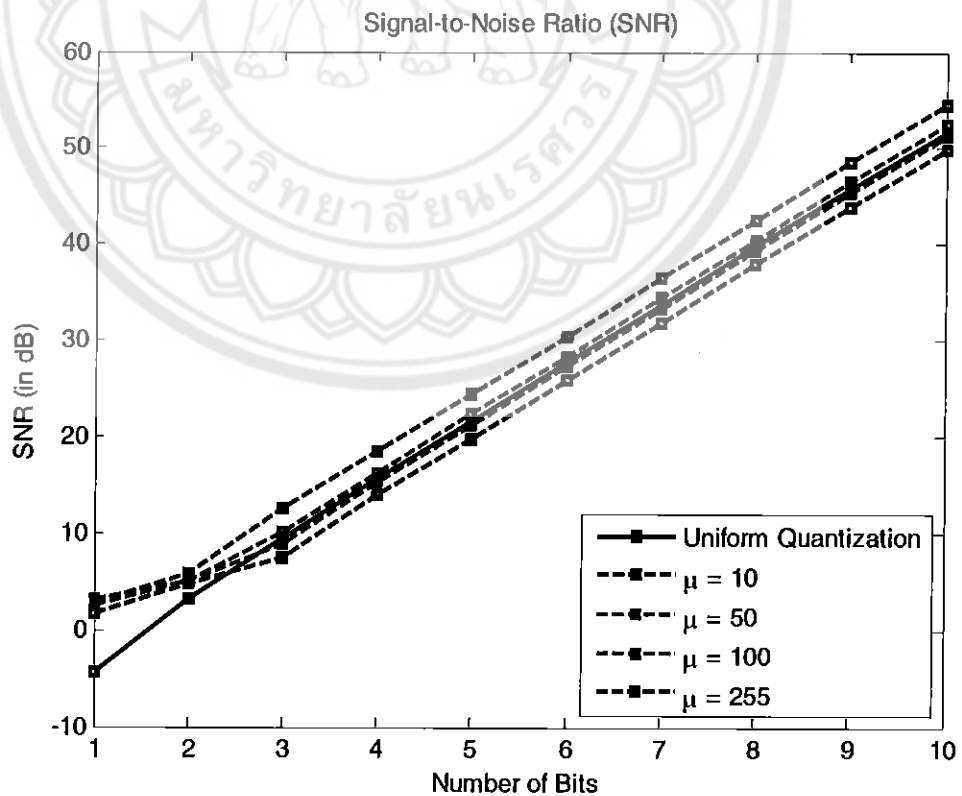
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.4368	4.1759	8.1403	9.0247	9.4727
2	4	3.1026	9.0274	11.3115	12.2795	13.5829
3	8	9.5796	15.1108	17.3391	18.0187	18.7391
4	16	15.6662	21.0850	23.3423	24.0804	24.9098
5	32	21.6757	27.1158	29.3619	30.0843	30.8545
6	64	27.7193	33.1128	35.3995	36.1111	36.8848
7	128	33.7255	39.1281	41.4252	42.1505	42.8875
8	256	39.7417	45.1758	47.4406	48.1757	48.9215
9	512	45.7623	51.1972	53.4520	54.1857	54.9304
10	1024	51.7780	57.2166	59.4690	60.1884	60.9482



รูปที่ 17ง SQNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที

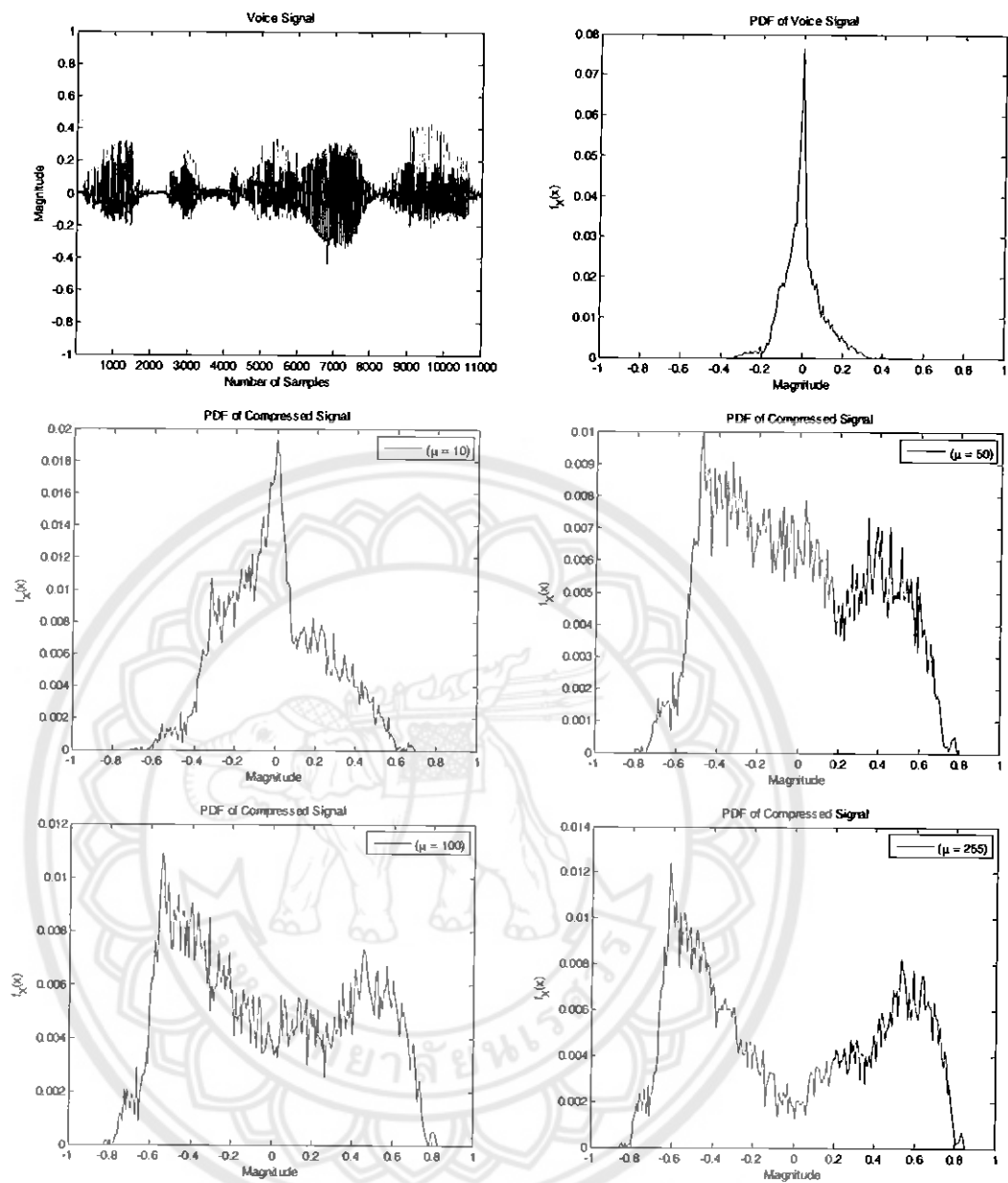
ตารางที่ 12ง SNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-4.4368	2.7657	3.2620	2.5969	1.7480
2	4	3.1026	5.9103	5.0797	4.9913	4.8861
3	8	9.5796	12.5653	10.1339	8.8765	7.4873
4	16	15.6662	18.4633	16.3653	15.3311	14.0368
5	32	21.6757	24.5118	22.3689	21.2293	19.8524
6	64	27.7193	30.5217	28.4275	27.2578	25.8774
7	128	33.7255	36.5400	34.4742	33.3215	31.8857
8	256	39.7417	42.5750	40.4484	39.3360	37.9260
9	512	45.7623	48.5751	46.5007	45.3183	43.8912
10	1024	51.7780	54.5482	52.4492	51.3274	49.9389



รูปที่ 18ง SNR เสียงเพลงขนาด 10 วินาที





รูปที่ 19 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 5 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0094 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0588 \text{ W}$$

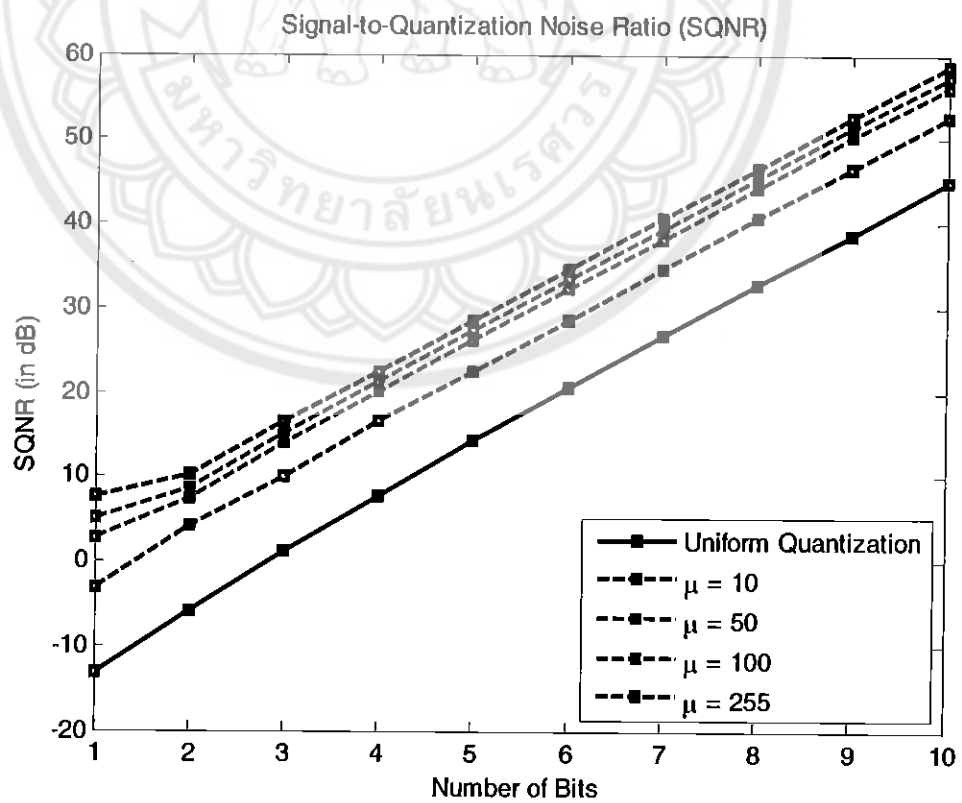
$$P_{signal, \mu=50} = 0.1340 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.1752 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2337 \text{ W}$$

ตารางที่ 13ง SQNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที

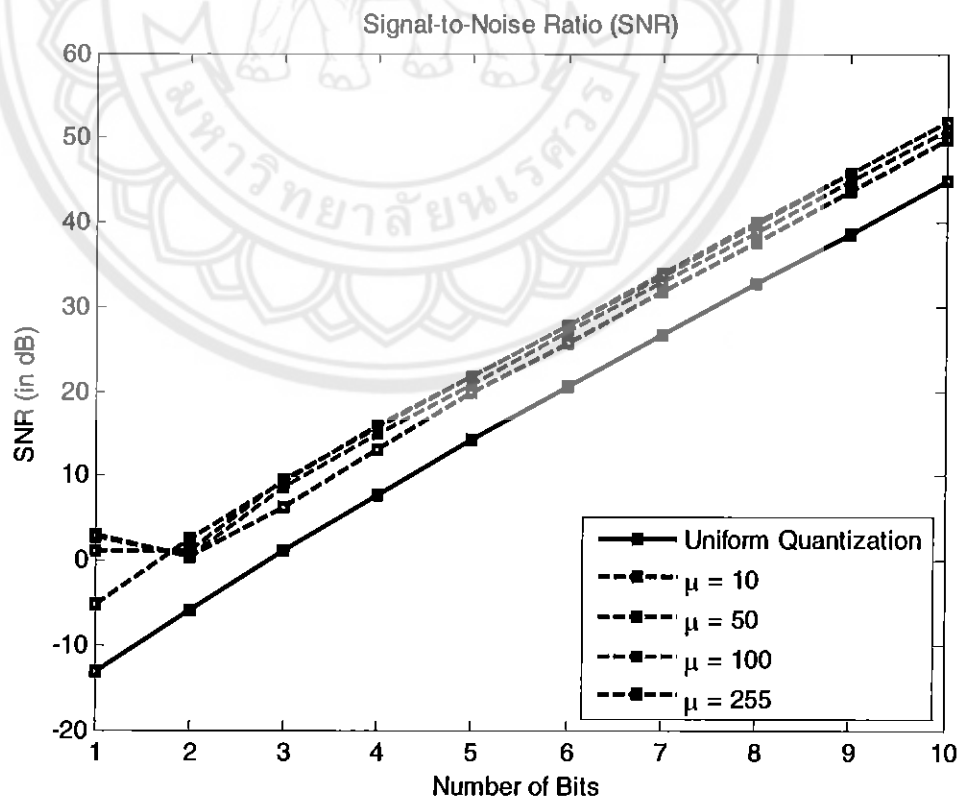
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-13.0312	-2.9339	2.9160	5.1390	7.6094
2	4	-5.9370	4.1088	7.5785	8.7111	10.1858
3	8	1.2596	10.1337	14.0987	15.2960	16.5662
4	16	7.7788	16.4913	20.1260	21.3798	22.4894
5	32	14.1739	22.5259	26.2375	27.3542	28.6295
6	64	20.5780	28.5548	32.1826	33.3781	34.5454
7	128	26.6635	34.6255	38.1643	39.3516	40.5969
8	256	32.6521	40.6134	44.1821	45.3660	46.6134
9	512	38.6953	46.6377	50.2185	51.3753	52.6583
10	1024	44.8095	52.6518	56.2074	57.3267	58.6594



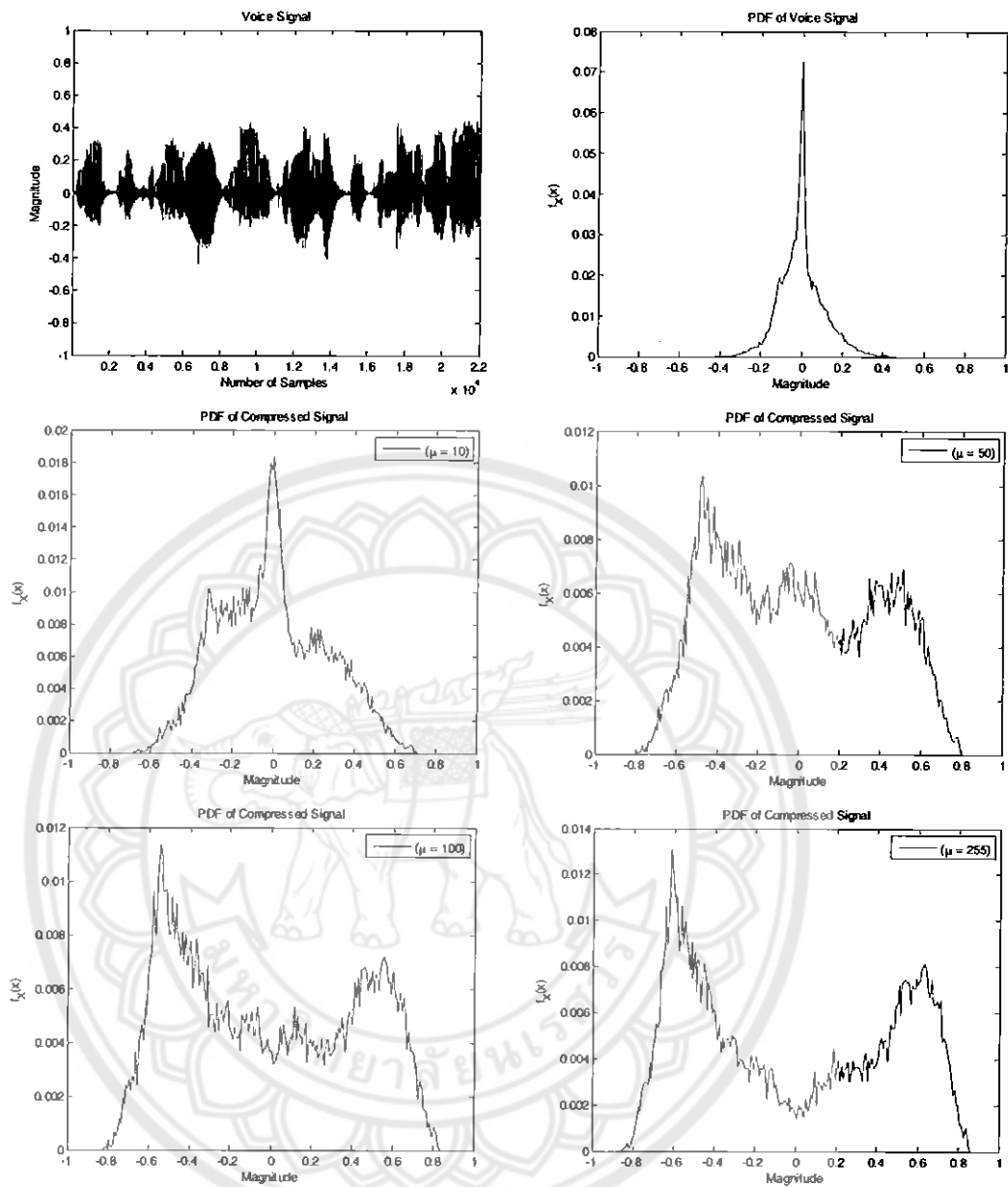
รูปที่ 20ง SQNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที

ตารางที่ 14ง SNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-13.0312	-5.1309	1.0744	2.7703	3.0454
2	4	-5.9370	2.5895	1.0766	0.3712	0.5124
3	8	1.2596	9.2813	9.4845	8.5657	6.2434
4	16	7.7788	15.8275	15.7127	15.0485	13.1364
5	32	14.1739	21.7735	21.8269	20.9266	19.9500
6	64	20.5780	27.7757	27.7893	27.0577	25.6937
7	128	26.6635	33.9197	33.7366	32.9942	31.7883
8	256	32.6521	39.8980	39.6573	38.8808	37.7157
9	512	38.6953	45.8875	45.8420	44.9644	43.7812
10	1024	44.8095	51.9044	51.8414	50.9635	49.7794



รูปที่ 21ง SNR เสียงพูดขนาด 1 วินาที



รูปที่ 22 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 2 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0115 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0685 \text{ W}$$

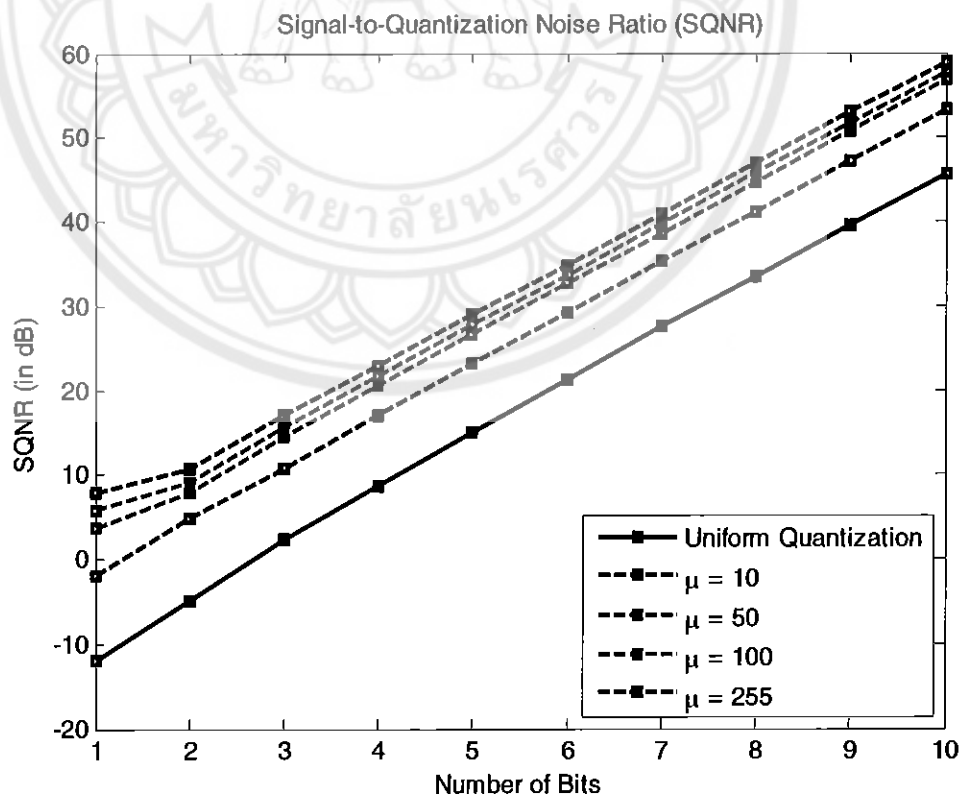
$$P_{signal, \mu=50} = 0.1499 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.1929 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2527 \text{ W}$$

ตารางที่ 15ง SQNR เสียงพูดขนาด 2 วินาที

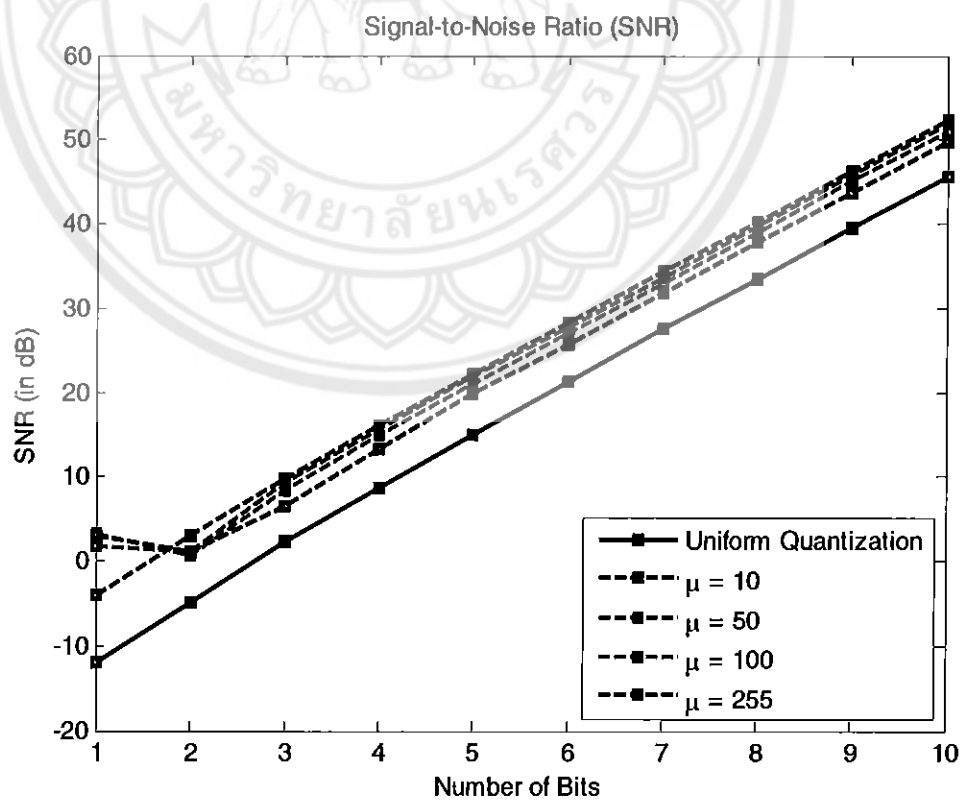
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.0156	-1.9511	3.7145	5.7724	7.9479
2	4	-4.8049	4.8092	7.8462	9.0189	10.6558
3	8	2.3744	10.7746	14.5148	15.7405	16.9925
4	16	8.6509	17.1082	20.6003	21.7815	22.8282
5	32	14.9993	23.1814	26.6985	27.7406	28.8903
6	64	21.3968	29.2472	32.6681	33.7790	34.8834
7	128	27.5162	35.2909	38.6221	39.7707	40.9201
8	256	33.5289	41.2840	44.6806	45.8070	46.9576
9	512	39.5468	47.3040	50.7158	51.8102	52.9887
10	1024	45.6024	53.3514	56.7355	57.7637	59.0293



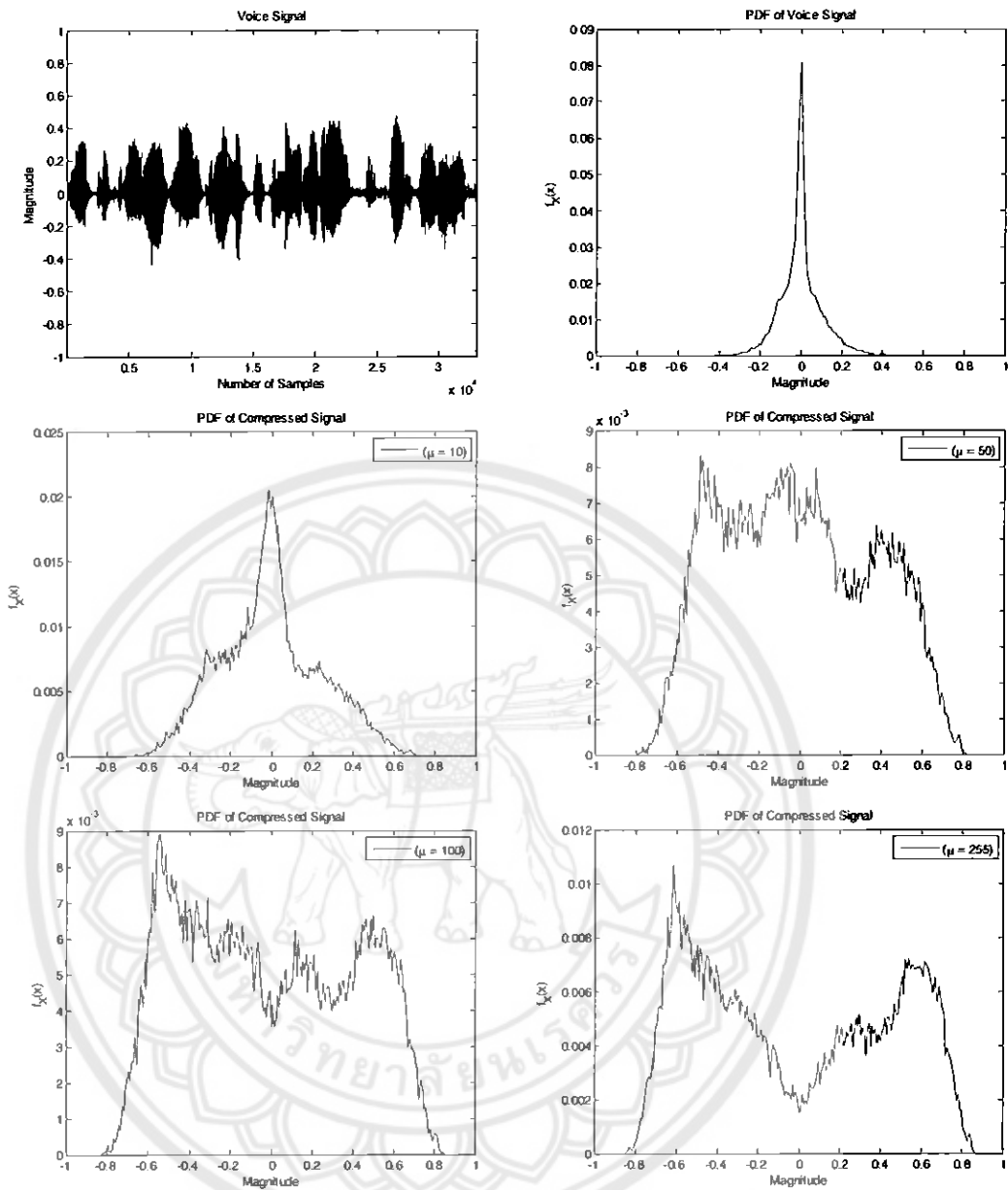
รูปที่ 23ง SQNR เสียงพูดขนาด 2 วินาที

ตารางที่ 16ง SNR เสียงพูดขนาด 2 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.0156	-3.9896	1.9579	3.2017	3.0179
2	4	-4.8049	3.0411	1.2214	0.7047	1.1520
3	8	2.3744	9.7913	9.4261	8.4132	6.4485
4	16	8.6509	16.1482	15.6867	14.9735	13.4448
5	32	14.9993	22.1387	21.9568	20.9488	19.7696
6	64	21.3968	28.2413	27.8874	27.0643	25.7350
7	128	27.5162	34.2903	33.7975	33.0724	31.8288
8	256	33.5289	40.2521	39.8440	39.0466	37.8520
9	512	39.5468	46.2420	45.8942	45.0472	43.8378
10	1024	45.6024	52.3812	51.9841	51.0385	49.8813



รูปที่ 24ง SNR เสียงพูดขนาด 2 วินาที



รูปที่ 25 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 3 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0098 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0595 \text{ W}$$

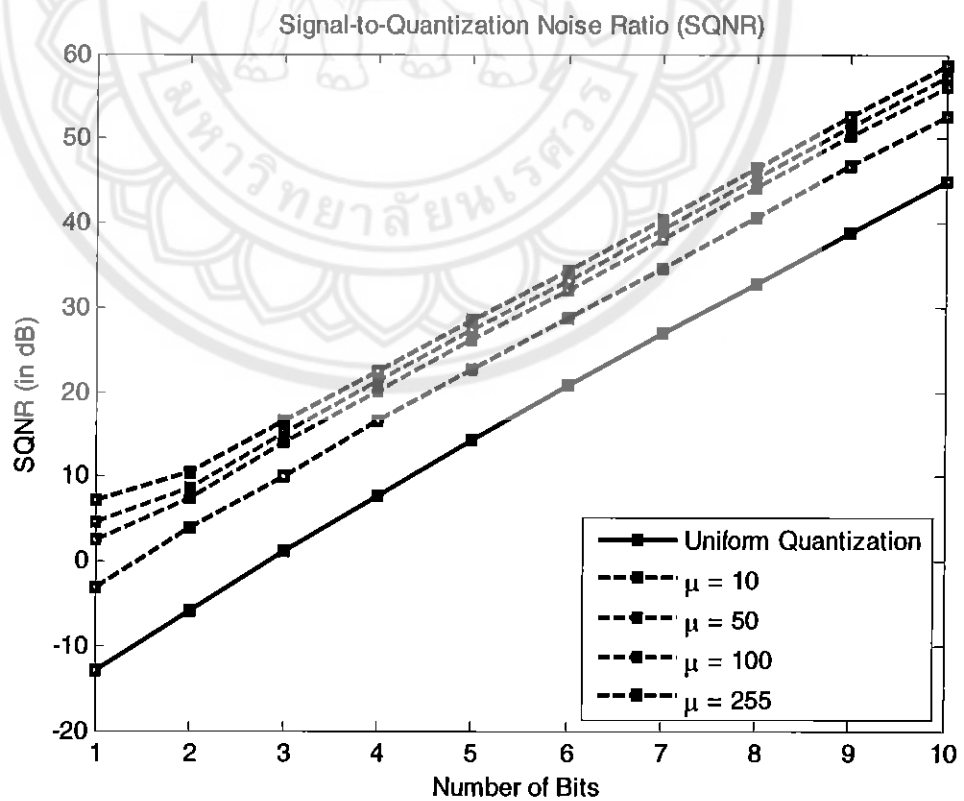
$$P_{signal, \mu=50} = 0.1331 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.1732 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2302 \text{ W}$$

ตารางที่ 17ง SQNR เสียงพูดขนาด 3 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.8840	-2.9841	2.6299	4.7710	7.2089
2	4	-5.8228	3.8836	7.4546	8.7642	10.4317
3	8	1.2731	10.1324	14.1065	15.3023	16.5710
4	16	7.7489	16.5422	20.1006	21.2816	22.4637
5	32	14.2822	22.5939	26.1745	27.2525	28.4665
6	64	20.7198	28.6580	32.1537	33.3089	34.4696
7	128	26.8111	34.6896	38.1204	39.3028	40.5125
8	256	32.8269	40.6712	44.1833	45.3097	46.5742
9	512	38.8388	46.7059	50.2125	51.3537	52.5704
10	1024	44.8892	52.7072	56.2045	57.3269	58.6038

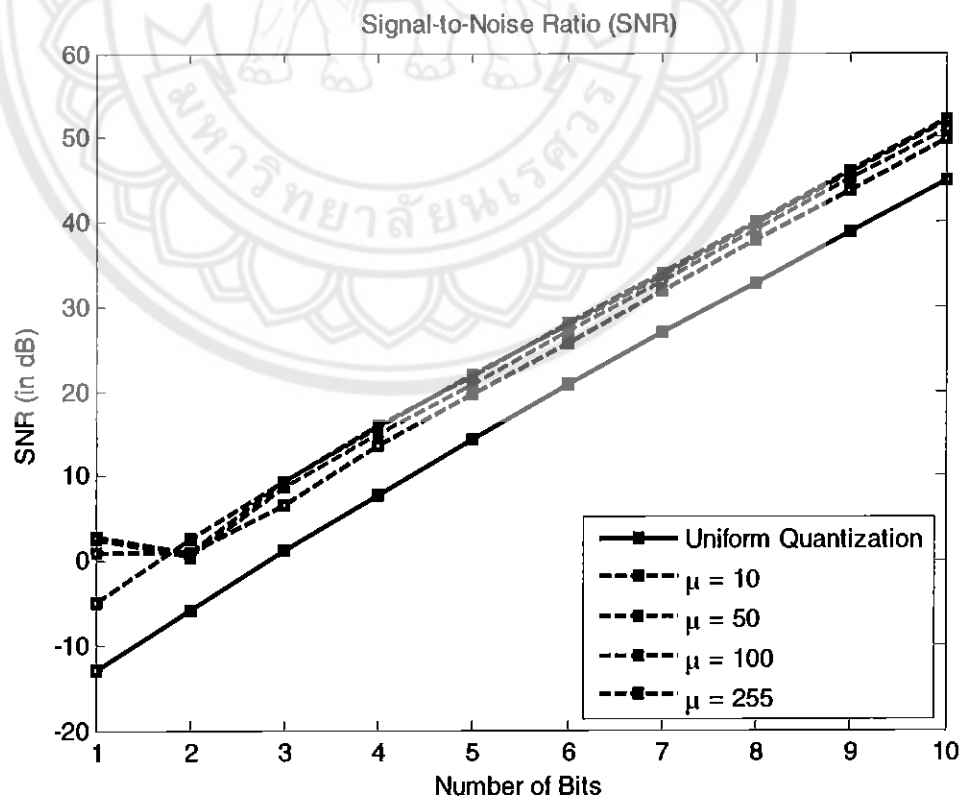


รูปที่ 26ง SQNR เสียงพูดขนาด 3 วินาที

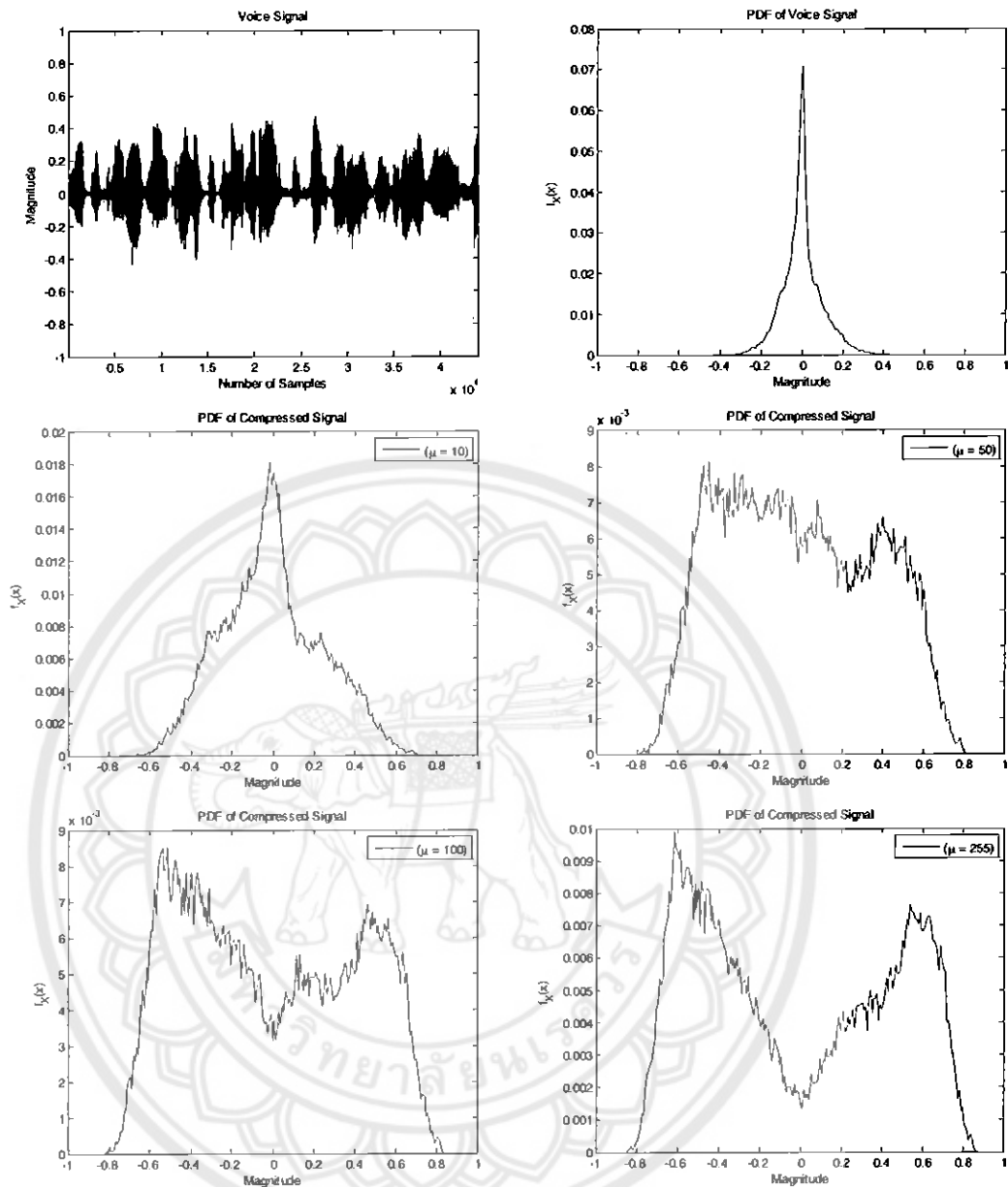


ตารางที่ 18 SNR เสียงพูดขนาด 3 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.8840	-5.0249	1.0292	2.6334	2.8910
2	4	-5.8228	2.6136	1.0453	0.5713	0.9497
3	8	1.2731	9.4643	9.4436	8.5595	6.6299
4	16	7.7489	15.8642	15.6860	14.8570	13.5262
5	32	14.2822	21.8564	21.8879	20.8731	19.7225
6	64	20.7198	27.9647	27.7974	27.0283	25.7187
7	128	26.8111	34.0032	33.7432	33.0396	31.7889
8	256	32.8269	39.9589	39.7935	39.0179	37.8445
9	512	38.8388	45.9706	45.8457	45.0329	43.8234
10	1024	44.8892	52.0490	51.8914	51.0240	49.8724



รูปที่ 27 SNR เสียงพูดขนาด 3 วินาที



รูปที่ 28ง รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 4 วินาที

**กำลังของสัญญาณ**

$$P_{signal} = 0.0095 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0592 \text{ W}$$

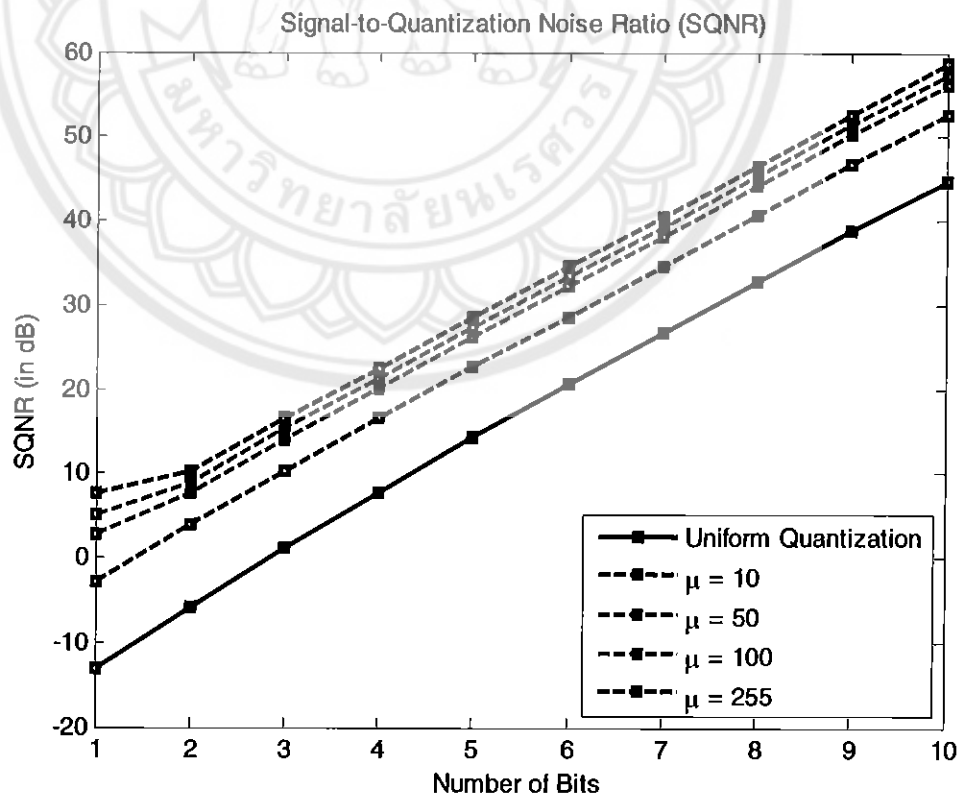
$$P_{signal, \mu=50} = 0.1342 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.1752 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2336 \text{ W}$$

ตารางที่ 19ง SQNR เสียงพูดขนาด 4 วินาที

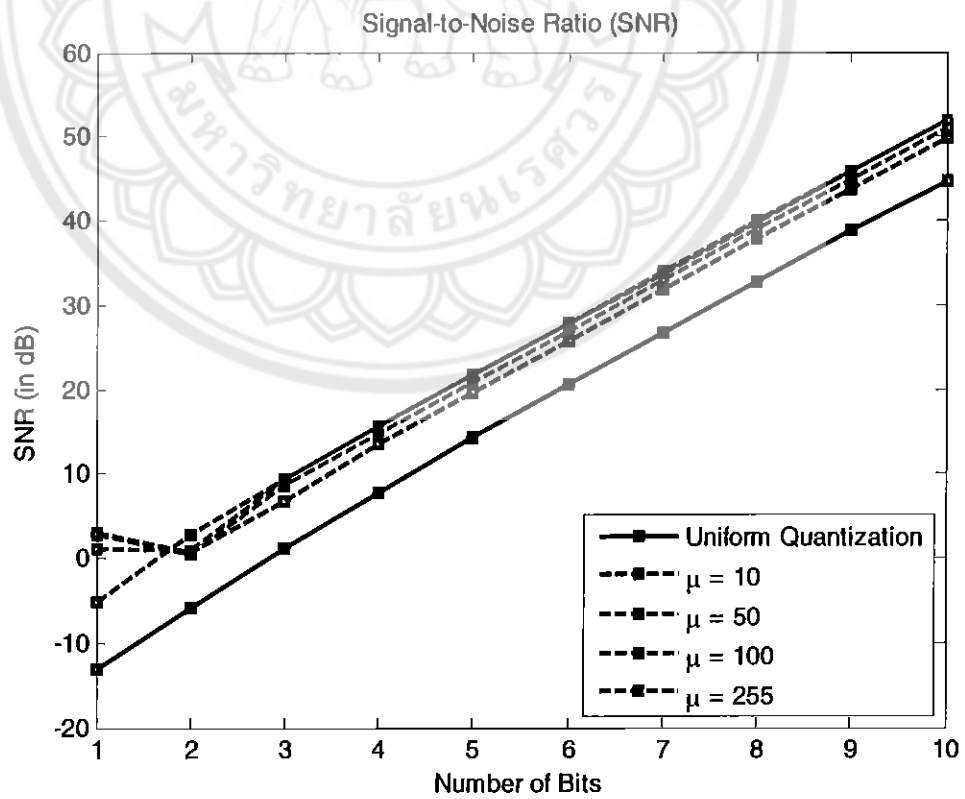
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.9971	-2.9163	2.8989	5.1223	7.6156
2	4	-5.9025	4.0614	7.6074	8.8292	10.3609
3	8	1.2784	10.2377	14.1415	15.3648	16.6390
4	16	7.8148	16.5340	20.1367	21.3162	22.5391
5	32	14.2761	22.5969	26.2014	27.3139	28.5298
6	64	20.6214	28.6355	32.1800	33.3477	34.5508
7	128	26.6803	34.6652	38.1731	39.3493	40.5797
8	256	32.7030	40.6632	44.2122	45.3490	46.6241
9	512	38.7193	46.6863	50.2358	51.4058	52.6414
10	1024	44.7717	52.6762	56.2385	57.3900	58.6625



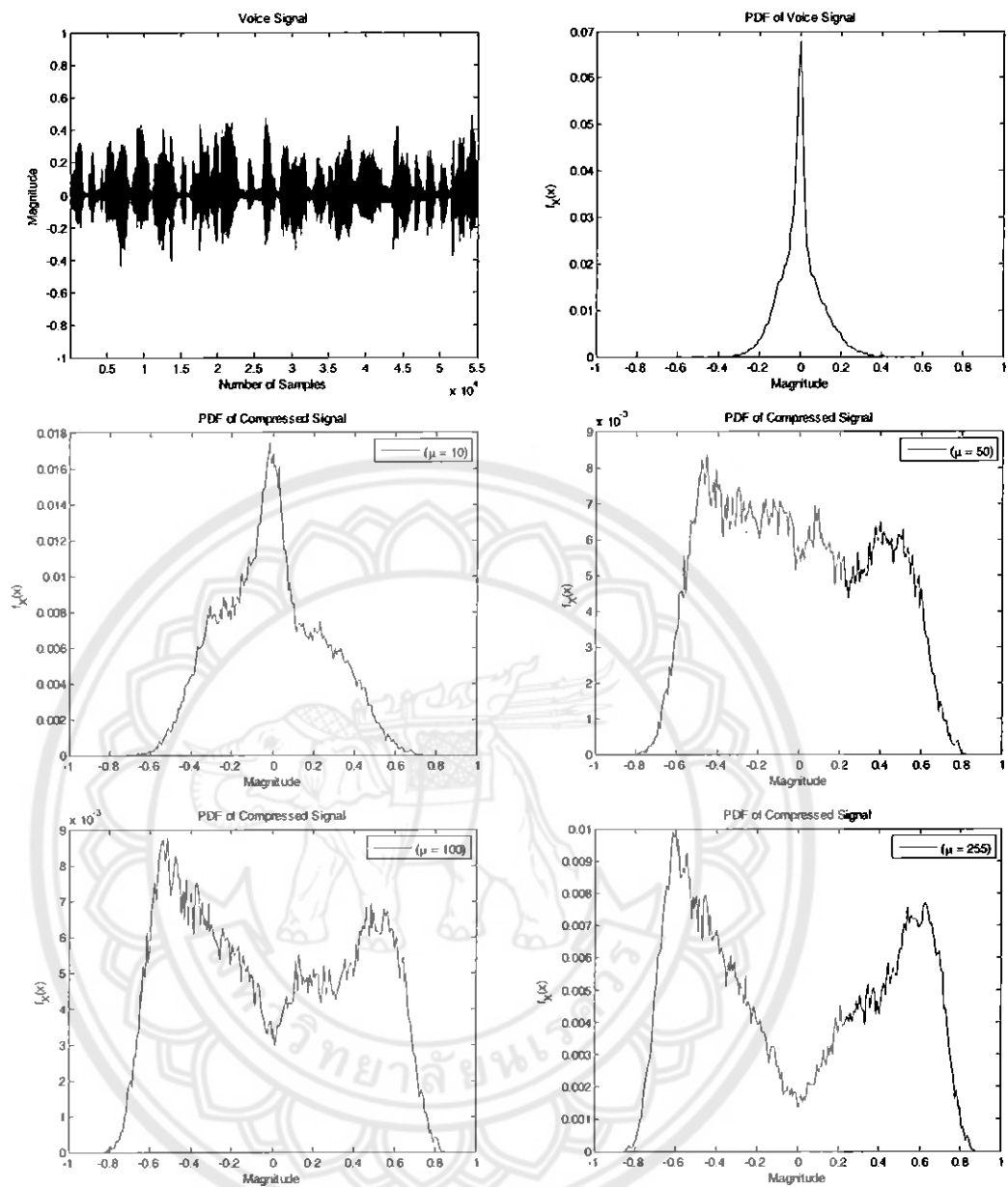
รูปที่ 29ง SQNR เสียงพูดขนาด 4 วินาที

ตารางที่ 20ง SNR เสียงพูดขนาด 4 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.9971	-5.0967	1.0932	2.7724	3.0344
2	4	-5.9025	2.7204	0.9067	0.4031	0.6862
3	8	1.2784	9.4366	9.4671	8.6746	6.6997
4	16	7.8148	15.7673	15.6096	14.8535	13.4980
5	32	14.2761	21.7868	21.8231	20.9174	19.6815
6	64	20.6214	27.8756	27.7498	27.0070	25.7006
7	128	26.6803	33.9012	33.7223	33.0230	31.7598
8	256	32.7030	39.8846	39.7537	39.0046	37.8071
9	512	38.7193	45.8851	45.7931	45.0277	43.8096
10	1024	44.7717	51.9409	51.8338	51.0213	49.8553



รูปที่ 30ง SNR เสียงพูดขนาด 4 วินาที



รูปที่ 31 รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 5 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0097 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0608 \text{ W}$$

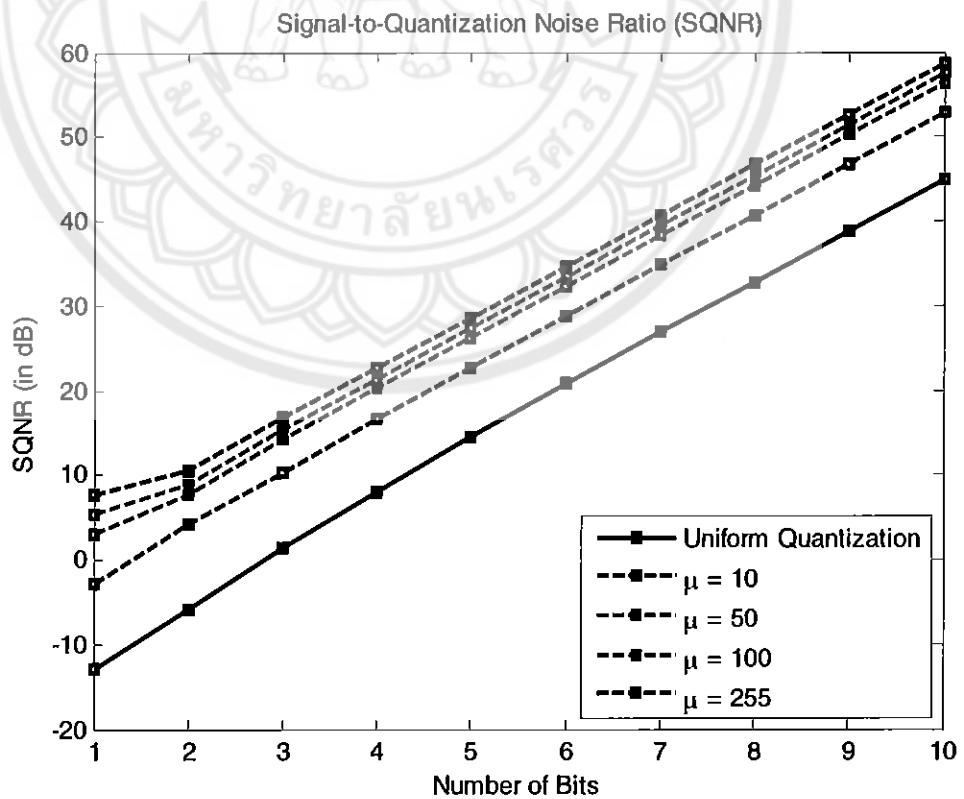
$$P_{signal, \mu=50} = 0.1372 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=100} = 0.1788 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2377 \text{ W}$$

ตารางที่ 21ง SQNR เสียงพูดขนาด 5 วินาที

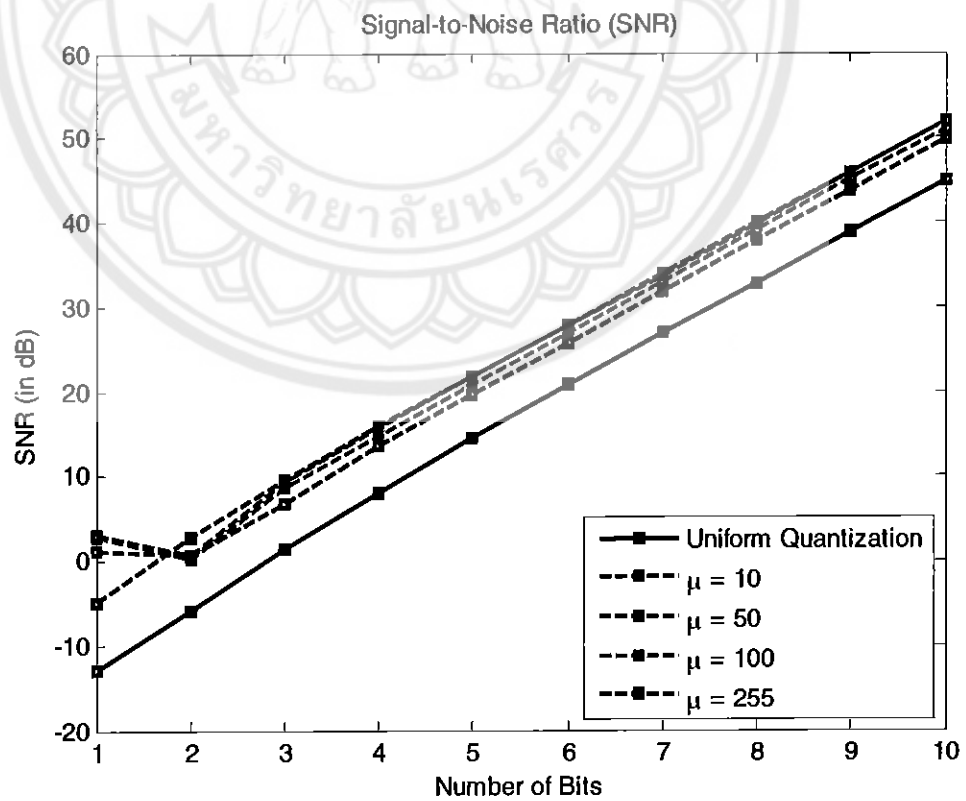
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.8626	-2.7237	3.0962	5.3043	7.7551
2	4	-5.7359	4.2087	7.6521	8.9003	10.4799
3	8	1.4590	10.3853	14.2350	15.4651	16.7564
4	16	7.9360	16.6615	20.2396	21.3869	22.6246
5	32	14.4085	22.7243	26.2917	27.3970	28.6147
6	64	20.7409	28.7404	32.2665	33.4179	34.6371
7	128	26.7912	34.7632	38.2789	39.4265	40.6711
8	256	32.8072	40.7680	44.3128	45.4444	46.6993
9	512	38.8152	46.7968	50.3368	51.4922	52.7187
10	1024	44.8727	52.7962	56.3410	57.4835	58.7395



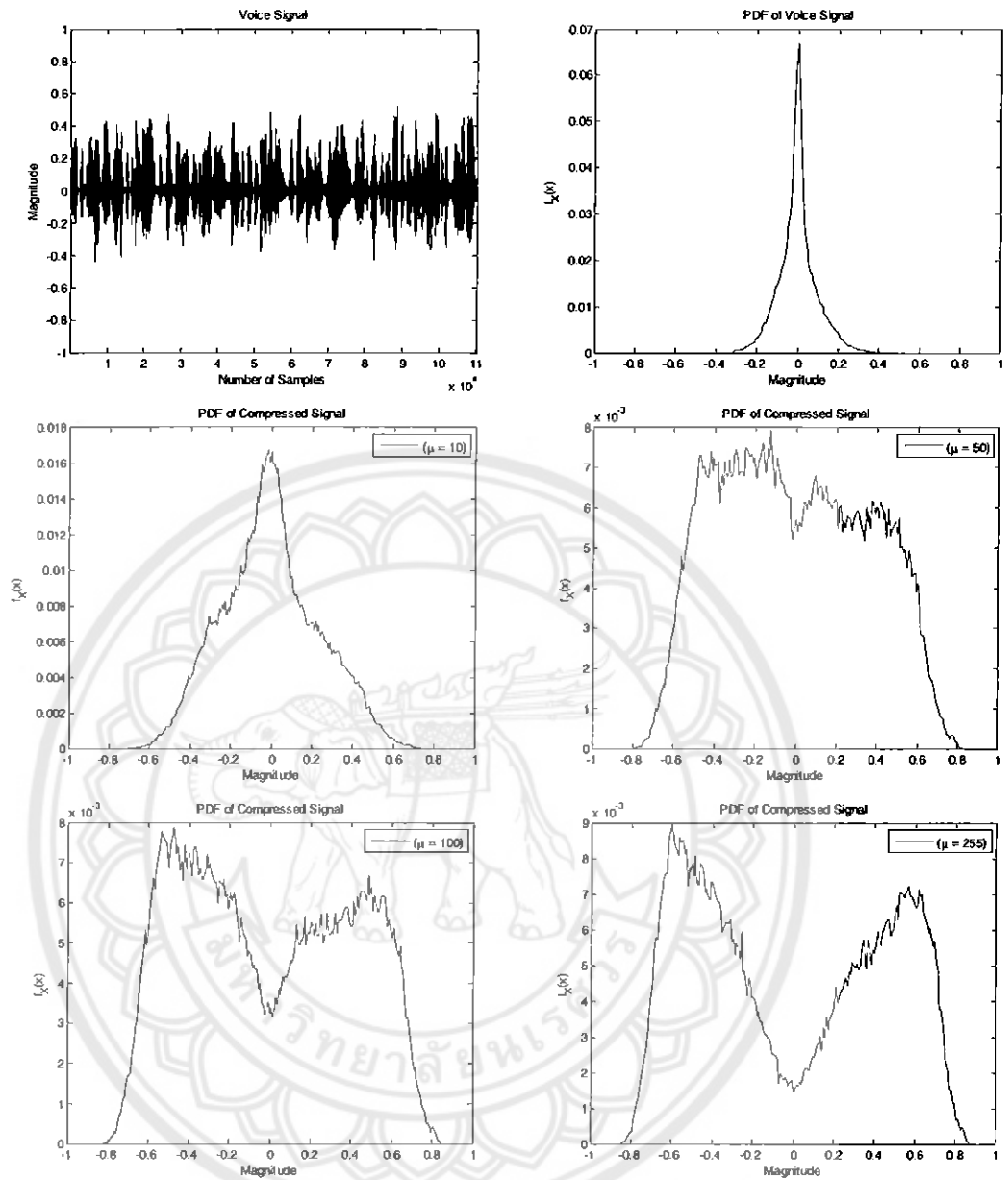
รูปที่ 32ง SQNR เสียงพูดขนาด 5 วินาที

ตารางที่ 22ง SNR เสียงพูดขนาด 5 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SNR of Uniform Quantization	SNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-12.8626	-4.9254	1.2793	2.9116	3.0883
2	4	-5.7359	2.8385	0.7736	0.3350	0.7300
3	8	1.4590	9.5254	9.4612	8.7669	6.8456
4	16	7.9360	15.8064	15.6114	14.8278	13.5594
5	32	14.4085	21.8320	21.8003	20.9137	19.7066
6	64	20.7409	27.8921	27.7332	26.9803	25.7161
7	128	26.7912	33.9027	33.7670	32.9985	31.7759
8	256	32.8072	39.8997	39.7795	39.0203	37.8236
9	512	38.8152	45.9276	45.8121	45.0519	43.8251
10	1024	44.8727	51.9712	51.8401	51.0630	49.8593



รูปที่ 33ง SNR เสียงพูดขนาด 5 วินาที



รูปที่ 34ง รูปสัญญาณและ PDF ของเสียงเพลงขนาด 10 วินาที

กำลังของสัญญาณ

$$P_{signal} = 0.0090 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=10} = 0.0565 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=50} = 0.1297 \text{ W}$$

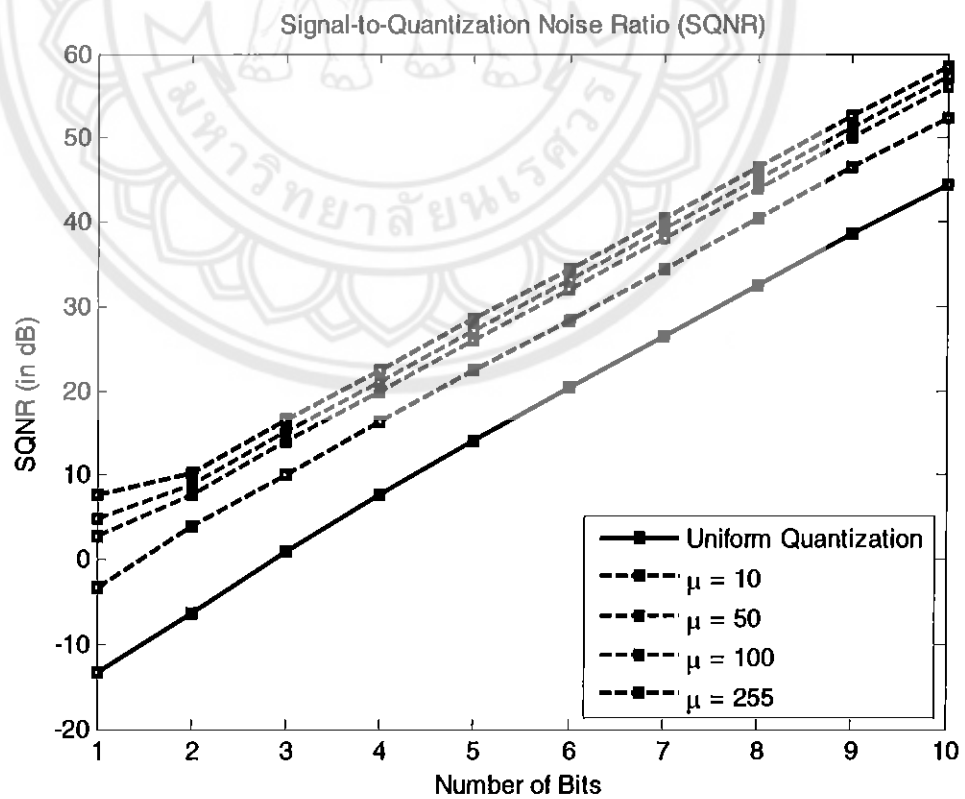
$$P_{signal, \mu=100} = 0.1703 \text{ W}$$

$$P_{signal, \mu=255} = 0.2285 \text{ W}$$



ตารางที่ 23ง SQNR เสียงพูดขนาด 10 วินาที

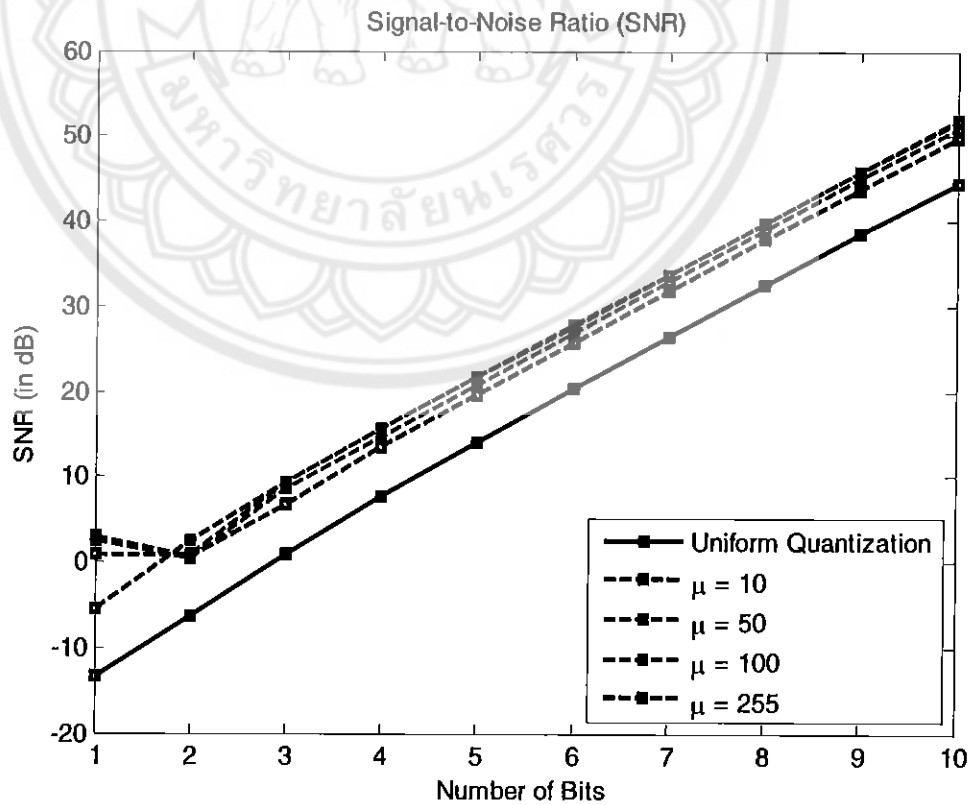
Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-13.2749	-3.1994	2.6960	4.9934	7.6094
2	4	-6.2149	3.8726	7.6086	8.8374	10.2818
3	8	0.9816	10.1540	14.0033	15.2208	16.5518
4	16	7.6230	16.3795	19.9934	21.1592	22.4546
5	32	14.1458	22.3985	26.0078	27.1681	28.4518
6	64	20.4157	28.4176	32.0090	33.2030	34.4719
7	128	26.4380	34.4492	38.0413	39.2187	40.5049
8	256	32.4616	40.4548	44.0796	45.2437	46.5219
9	512	38.4879	46.4921	50.0969	51.2735	52.5518
10	1024	44.5339	52.4954	56.0913	57.2786	58.5685



รูปที่ 35ง SQNR เสียงพูดขนาด 10 วินาที

ตารางที่ 24ง SNR เสียงพูดขนาด 10 วินาที

Number of bits per samples	Quantization levels	SQNR of Uniform Quantization	SQNR of Non-uniform Quantization			
			$\mu = 10$	$\mu = 50$	$\mu = 100$	$\mu = 255$
1	2	-13.2749	-5.4127	0.8191	2.6104	3.0164
2	4	-6.2149	2.6704	0.8685	0.3736	0.5954
3	8	0.9816	9.4146	9.4003	8.6829	6.8201
4	16	7.6230	15.6736	15.6100	14.7826	13.5922
5	32	14.1458	21.6734	21.7007	20.8860	19.7113
6	64	20.4157	27.7236	27.6994	26.9329	25.7554
7	128	26.4380	33.7549	33.7461	32.9699	31.7910
8	256	32.4616	39.7538	39.7347	38.9978	37.7828
9	512	38.4879	45.7858	45.7787	45.0413	43.8042
10	1024	44.5339	51.8143	51.7992	51.0590	49.8332



รูปที่ 36ง SNR เสียงพูดขนาด 10 วินาที