

การพัฒนาการเข้ารหัสเสียงพูดแบบ LD-CELP ที่อัตรา 16 กิโลบิตต่อวินาที
สำหรับการทำงานตามเวลาจริงโดยใช้ TMS320C50



นายพูนลาภ ลามศรีจันทร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

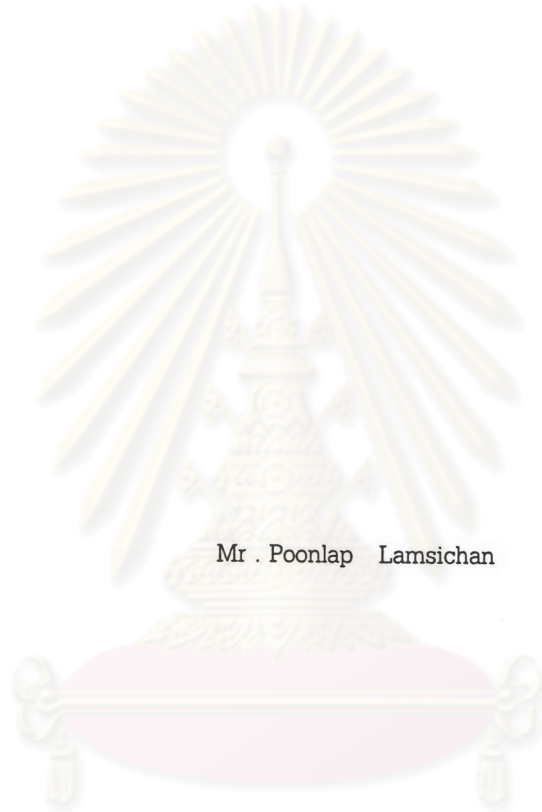
พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-937-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17288307

DEVELOPMENT OF THE LD-CELP SPEECH CODER AT 16 KBPS
FOR REAL-TIME IMPLEMENTATION USING TMS320C50



Mr . Poonlap Lamsichan

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

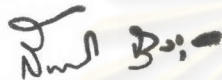
1996

ISBN 974-634-937-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาการเข้ารหัสเสียงพูดแบบ LD-CELP ที่อัตรา 16 กิโลบิตต่อวินาทีสำหรับการทำงานตาม
เวลาจริงโดยใช้ TMS320C50

โดย นายพูนลาภ ลามศรีจันทร์
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ อุงสุวรรณ)

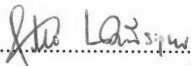
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



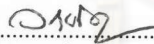
.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

ประธานกรรมการ



.....
(อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



.....
(อาจารย์ ดร.วาทิต บุญจพลกุล)

กรรมการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

พูนลาภ ลามศรีจันทร์ : การพัฒนาการเข้ารหัสเสียงพูดแบบ LD-CELP ที่อัตรา 16 กิโลบิตต่อวินาทีสำหรับการทำงานตามเวลาจริงโดยใช้ TMS320C50 (DEVELOPMENT OF THE LD-CELP SPEECH CODER AT 16 KBPS FOR REAL-TIME IMPLEMENTATION USING TMS320C50) อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สุวิทย์ นาคพิระยุทธ 111 หน้า. ISBN 974-634-937-6

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการสร้างตัวเข้ารหัสเสียงพูดที่อัตรา 16 กิโลบิตต่อวินาทีสำหรับการทำงานตามเวลาจริง โดยใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบจุดตรึงรุ่น TMS320C50 เพื่อทำงานตามมาตรฐาน G.728 ของ ITU-T มาตรฐานการเข้ารหัสเสียง G.728 ใช้หลักการของ LD-CELP ร่วมกับทฤษฎีการสังเคราะห์ การทำนายและการปรับเปลี่ยนค่าแบบย้อนหลัง การควอนไทซ์แบบเวกเตอร์ และโพสทีฟิลเตอร์

ในขั้นแรกเป็นการพัฒนาโปรแกรมจำลองการทำงานระดับสูงโดยใช้ MATLAB บนไมโครคอมพิวเตอร์ การจำลองการทำงานนี้ใช้การคำนวณแบบจุดลอยซึ่งจะใช้เป็นโมเดลอ้างอิงสำหรับการแก้ไขข้อผิดพลาดและประเมินคุณภาพของการทำงานแบบจุดตรึง ในขั้นต่อไปเป็นการเขียนโปรแกรมทำงานแบบจุดตรึงด้วยภาษาแอสเซมบลีของ TMS320C50 ซึ่งสามารถตรวจสอบการทำงานได้ด้วยโปรแกรมซิมูเลเตอร์บนเอ็มเอสดีเอส หรือทดสอบการทำงานตามเวลาจริงบนบอร์ด DSK ของ TMS320C50 ที่มีวงจรเชื่อมต่อสัญญาณอนาล็อกอยู่ในตัวเองแล้ว

ผลของตัวอย่างเสียงที่ผ่านการเข้ารหัสตามเวลาจริงจะถูกประเมินคุณภาพและเปรียบเทียบกับผลของการเข้ารหัสแบบจุดลอยจาก MATLAB ค่า SNR จากการเข้ารหัสแบบจุดลอยมีค่าในช่วง 17-27 เดซิเบลและจากการเข้ารหัสแบบจุดตรึงจะมีค่าต่ำลงไปประมาณ 2 เดซิเบลโดยเฉลี่ย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต พูนลาภ ลามศรีจันทร์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. นาคพิระยุทธ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C715661 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: LD-CELP / REAL-TIME / LPC / SPEECH CODING / TMS320C50

POONLAP LAMSICHAN : DEVELOPMENT OF THE LD-CELP SPEECH CODER AT 16 Kbps FOR REAL-TIME IMPLEMENTATION USING TMS320C50.

THESIS ADVISOR : SUVIT NAKPEERAYUTH. 111 PP. ISBN 974-634-937-6

The objective of this study is to implement real-time speech coder at 16 kbps. The implementation uses TMS320C50 fixed-point DSP chip and follows the ITU-T recommendation G.728. Recommendation G.728 is based on Low-delay Code-excited Linear Prediction (LD-CELP) technic together with analysis-by-synthesis, backward prediction and adaptation, vector quantization and postfilter.

The first step is to develop high level simulation program using MATLAB on microcomputer. This is a floating-point implementation which is used as a reference model for debugging and evaluating the fixed-point version. Next, the fixed-point assembly program for TMS320C50 can be debugged either by using MS-DOS based simulator or real-time testing on TMS320C50 DSK board which has built-in analog interface circuit.

The real-time decoded test speech output can be evaluated and compared with the floating-point output from MATLAB. The SNR of floating-point is around 17-27 dB and for the fixed-point is in average 2 dB lower.



ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา..... 2539.....

ลายมือชื่อนิสิต..... พจนานพ ลามสัจจนท์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... พจนานพ ลามสัจจนท์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศึกษากันภูมิสำหรับนิสิตปริญญาโทของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้รับทุนจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

ในการดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์สุวิทย์ นาคพิระยุทธ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัย แนวทางการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการวิจัย รวมทั้งจัดหาอุปกรณ์และทุนวิจัยเพื่อดำเนินการวิจัยอย่างครบถ้วน

ขอขอบคุณ คุณโอภาส ศิริครรชิตถาวร ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ และ คุณจิราพร เลิศอมรพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิมพ์และให้คำแนะนำที่สำคัญในการเขียนวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเพื่อนนิสิตปริญญาโททุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณน้องชายทั้งสองคนที่ได้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านตลอดเวลาที่ได้ศึกษาวิจัยจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ

บทที่

1. บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การวัดสมรรถนะ	4
2.2 การควอนไทซ์แบบเวกเตอร์	6
2.3 ทฤษฎีการเข้ารหัสแบบการทำนายพันธะเชิงเส้น	8
2.4 การเข้ารหัสเสียงแบบต่างๆ	11
2.5 มาตรฐาน ITU-T G.728 LD-CELP	14
3. ระบบวิเคราะห์และภาคประมวลผลสัญญาณดิจิทัลโดยใช้ชิป TMS320C50	22
3.1 TMS320C50	22
3.2 วงจรเชื่อมต่อสัญญาณอนาล็อก (Analog Interface Circuit--AIC)	25
4. ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
4.1 การจำลองโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	26
4.1.1 การจำลองโปรแกรมโดยใช้ MATLAB	26

บทที่	หน้า
4.1.2 การจำลองโปรแกรมโดยใช้ตัวจำลองโปรแกรม	27
4.2 การทำงานตามเวลาจริงบน TMS320C50 DSK	33
5. การทดลองและการประเมินผล	39
5.1 การทดลองบนคอมพิวเตอร์เพื่อวัดคุณภาพของการเข้ารหัสเสียง	39
5.2 การทดลองเข้ารหัสเสียงตามเวลาจริง	51
6. บทสรุป	55
รายการอ้างอิง	57
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก ผลการทดลองเพิ่มเติม	59
ภาคผนวก ข ข้อเสนอแนะในการเขียนโปรแกรม	92
ภาคผนวก ค การกำหนดค่าเริ่มต้นให้แก่ AIC	95
ภาคผนวก ง ตัวอย่างโปรแกรม	100
ภาคผนวก จ ตารางเปรียบเทียบปริมาณการคำนวณและหน่วยความจำที่ต้องการ	106
ประวัติผู้เขียน	111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตาราง 2.1	ระดับคะแนนของการทดสอบแบบ MOS	5
ตาราง 3.1	คุณสมบัติทั่วไปของ DSP รุ่น TMS320C5x	23
ตาราง 4.1	การเปรียบเทียบการคำนวณและหน่วยความจำที่ต้องการ	36
ตาราง 4.2	จำนวนคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณของตัวเข้ารหัส	38
ตาราง 5.1	ผลการทดลองคำนวณค่า SNR ของการเข้ารหัสเสียงตัวอย่างบนคอมพิวเตอร์	50
ตาราง ข.1	จำนวนรอบคำสั่งที่ต้องการสำหรับการเขียนค่าลงในรีจิสเตอร์	92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
รูป 2.1. แผนภาพการทำงานของการควอนไตซ์แบบเวกเตอร์	7
รูป 2.2 ตัวอย่างของการควอนไตซ์ในปริภูมิ 2 มิติ	7
รูป 2.3 (a) แบบจำลองการกำเนิดเสียงจริง	9
(b) แบบจำลองเลียนแบบการกำเนิดเสียงจริงโดยใช้การวิเคราะห์ แบบการทำนายพันระเชิงเส้น(LPC)	9
รูป 2.4 (a) ระบบกำเนิดเสียงจริง	10
(b) ระบบที่เลียนแบบการกำเนิดเสียงจริงและการวัดค่าความผิดพลาด	10
รูป 2.5 ตัวเข้ารหัสของ CELP แบบปกติ	12
รูป 2.6 ตัวถอดรหัสของ VSELP	13
รูป 2.7 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวเข้ารหัสของ LD-CELP	14
รูป 2.8 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวถอดรหัสของ LD-CELP	15
รูป 2.9 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวปรับเปลี่ยนของวงจรกรองเพิ่มน้ำหนักการรับฟัง	16
รูป 2.10 ลักษณะของไฮบริดวินโดว์	17
รูป 2.11 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวปรับเปลี่ยนของวงจรกรองสังเคราะห์	18
รูป 2.12 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของส่วนปรับเปลี่ยนอัตราขยาย	19
รูป 2.13 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการค้นหาชุดรหัส	20
รูป 2.14 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของโพสต์ฟิลเตอร์	21
รูป 3.1 ตำแหน่งของหน่วยความจำของ 'C50	24
รูป 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของตัวเข้ารหัสและถอดรหัสบน MATLAB	27
รูป 4.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการพัฒนาโปรแกรมบนตัวจำลองโปรแกรม	29
รูป 4.3 ตำแหน่งของส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรมในหน่วยความจำของ 'C50	31
รูป 4.4 แผนผังแสดงการทำงานของตัวเข้ารหัสบนตัวจำลองโปรแกรม	32

รูป 4.5	รูปแบบการรับส่งข้อมูลในการทำงานเข้ารหัสเสียงตามเวลาจริง	33
รูป 4.6	แผนผังแสดงการทำงานของตัวเข้ารหัสสำหรับการทำงานตามเวลาจริง	34
รูป 4.7	จำนวนคำสั่งที่ต้องคำนวณในแต่ละเวกเตอร์ของตัวเข้ารหัสก่อนการกระจายภาวะ	35
รูป 4.8	จำนวนคำสั่งที่ต้องคำนวณในแต่ละเวกเตอร์ของตัวเข้ารหัสหลังการกระจายภาวะ	36
รูป 4.9	แผนภาพการทำงานของบล็อกค้นหาชุดรหัส	37
รูป 5.1	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "สวัสดีครับ"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	42
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	42
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	42
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	42
รูป 5.2	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "สวัสดีครับ"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	43
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	43
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	43
รูป 5.3	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 601 ถึง 856 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	44
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	44
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	44
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	44
รูป 5.4	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 601 ถึง 856 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	45
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	45
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	45
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	45
รูป 5.5	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1601 ถึง 1856 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	46
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	46
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	46
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	46

รูป

หน้า

รูป 5.6	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1601 ถึง 1856 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	47
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	47
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	47
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	47
รูป 5.7	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3101 ถึง 3356 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	48
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	48
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	48
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	48
รูป 5.8	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3101 ถึง 3356 ของเสียงจากรูป 5.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	49
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	49
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	49
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	49
รูป 5.9	จำนวนรอบการทำงานเหลือเมื่อใช้อัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 8.0 กิโลเฮิร์ตซ์	52
รูป 5.10	จำนวนรอบการทำงานเหลือเมื่อใช้อัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 7.54 กิโลเฮิร์ตซ์	53
รูป 5.11	จำนวนรอบการทำงานเหลือเมื่อใช้อัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 7.17 กิโลเฮิร์ตซ์	53
รูป ก.1	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "เดิน"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	60
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	60
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	60
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	60
รูป ก.2	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "เดิน"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	61
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	61
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	61

รูป ก.3	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	62
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	62
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	62
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	62
รูป ก.4	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.1	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	63
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	63
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	63
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	63
รูป ก.5	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "วันอาทิตย์"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	64
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	64
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	64
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	64
รูป ก.6	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "วันอาทิตย์"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	65
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	65
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	65
รูป ก.7	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1501 ถึง 1756 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	66
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	66
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	66
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	66
รูป ก.8	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1501 ถึง 1756 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	67
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	67
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	67
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	67

รูป ก.9	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3001 ถึง 3256 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	68
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	68
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	68
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	68
รูป ก.10	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3001 ถึง 3256 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	69
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	69
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	69
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	69
รูป ก.11	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 5501 ถึง 5756 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	70
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	70
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	70
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	70
รูป ก.12	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 5501 ถึง 5756 ของเสียงจากรูป ก.5	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	71
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	71
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	71
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	71
รูป ก.13	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "หนึ่ง"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	72
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	72
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	72
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	72
รูป ก.14	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "หนึ่ง"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	73
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	73
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	73

รูป ก.15	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.13	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	74
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	74
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	74
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	74
รูป ก.16	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.13	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	75
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	75
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	75
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	75
รูป ก.17	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "สอง"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	76
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	76
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	76
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	76
รูป ก.18	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "สอง"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	77
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	77
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	77
รูป ก.19	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3001 ถึง 3256 ของเสียงจากรูป ก.17	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	78
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	78
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	78
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	78
รูป ก.20	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 3001 ถึง 3256 ของเสียงจากรูป ก.17	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	79
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	79
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	79
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	79

รูป ก.21	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "หก"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	80
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	80
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	80
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	80
รูป ก.22	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "หก"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	81
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	81
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	81
รูป ก.23	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1201 ถึง 1456 ของเสียงจากรูป ก.21	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	82
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	82
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	82
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	82
รูป ก.24	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1201 ถึง 1456 ของเสียงจากรูป ก.21	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	83
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	83
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	83
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	83
รูป ก.25	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "เจ็ด"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	84
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	84
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	84
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	84
รูป ก.26	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "เจ็ด"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	85
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพสท์ฟิลเตอร์บน MATLAB	85
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	85

รูป ก.27	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1051 ถึง 1306 ของเสียงจากรูป ก.25	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	86
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	86
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	86
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	86
รูป ก.28	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1051 ถึง 1306 ของเสียงจากรูป ก.25	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	87
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	87
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	87
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	87
รูป ก.29	สัญญาณเสียงทั้งหมดของเสียงพูดคำว่า "แปด"	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	88
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	88
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	88
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	88
รูป ก.30	ผลต่างระหว่างสัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสทั้งหมดกับสัญญาณเสียงต้นฉบับคำว่า "แปด"	
	(ก) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	89
	(ข) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	89
	(ค) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	89
รูป ก.31	สัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.29	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	90
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	90
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	90
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	90
รูป ก.32	สเปกตรัมของสัญญาณเสียงในช่วงตัวอย่างสุ่มที่ 1001 ถึง 1256 ของเสียงจากรูป ก.29	
	(ก) สัญญาณเสียงต้นฉบับ	91
	(ข) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบน MATLAB	91
	(ค) สัญญาณเสียงจากโพลต์ฟิลเตอร์บน MATLAB	91
	(ง) สัญญาณเสียงจากการเข้ารหัสบนแอสเซมบลี	91
รูป ค.1	การติดต่อแบบฮาร์ดแวร์ระหว่าง 'C50 และ AIC	93
รูป ค.2	รูปแบบการเก็บข้อมูลแบบ 16 บิตในการรับส่งข้อมูลของ AIC	95
รูป ค.3	รูปแบบการเก็บข้อมูลแบบ 16 บิตในการรับส่งข้อมูลครั้งที่ 2 ของ AIC	95