สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องดิจิไทซ์สัญญาณทรานเซียนท์

นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
นางสาวสรัญญา ญาติเสมอ

วน.
ว668ก
2539
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

b1255302

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transient Signal Digitizer

Mr. Phumin Jindajitawat

Miss Saranya Yardsamer

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	Transient Signal Digitizer
โดย	นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
	นางสาวสรัญญา ญาติเสมอ
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ
	รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิจัย

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

(รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิจัย) หัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงงานพิเศษ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ) ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริศักดิ์ เตชะทวีกุล) กรรมการ

(อาจารย์ประธาน บุรณศิริ) กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ เครื่องดิจิไทซ์สัญญาณทรานเซียนท์
นักศึกษา นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
นางสาวสรัญญา ญาติเสมอ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ
รองศาสตราจารย์สุรพล รักวิจัย
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ในโครงงานนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อแปลงสัญญาณทรานเซียนท์ หรือสัญญาณที่ไม่เป็นคาบให้เป็นตัวเลข โดยใช้ตัวแปลงสัญญาณ high speed flash converter CA3306 ที่มีความละเอียด 6 บิต และมีอัตราการสุ่มสูงสุด 20 Megasample ต่อวินาที การบันทึกด้วยความเร็วสูงทำได้โดยการใช้ตัวนับเลขฐานสองขนาด 17 บิต และ 128 kB SRAM HM628128 เป็นตัวบันทึกสัญญาณในรูปดิจิตอล รูปแบบคลื่นที่แปลงแล้วที่เก็บไว้ใน SRAM จะถูกอ่านและโหลดสู่ PC ที่ความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที รูปแบบที่โหลดขึ้นมาเป็นได้ทั้งข้อมูลที่ต่อเนื่องสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเอกซ์เซล (Excel) หรืออาจอยู่ในรูปของอินเทลเฮกไฟล์ (Intel hex file) สำหรับเขียนลงในหน่วยความจำถาวรเพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดรูปคลื่นใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title Transient Signal Digitizer

Name Mr. Phumin Jindajitawat

Miss Saranya Yardsamer

Special Project Advisor Asst. Prof. Wichit Sirichote

Assoc. Prof. Surapol Rakwichai

Department Applied Physics

Acadamic Year 1997

Abstract

A device used for digitizing of a nonperiodical or transient signal has been developed. The digitizer employs a high speed flash converter, CA3306 with a 6 bits resolution and maximum throughput of 10Megasample/second. High speed of recording was enabled by using a 17 bits binary counter and a 128kB SRAM, HM628128. A digitized waveform stored in the SRAM can be read and loaded to a PC at speed up to 9600bps. The uploading format can be a continuous data for Excel analyzing or an Intel hex file for writing into a nonvolatile memory to be used for reconstructing the waveform by an arbitrary waveform generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากหลายๆ ฝ่ายด้วยกันดังนี้

บิดาและมารดา	ผู้ให้กำเนิดและคอยอุปการะ รวมทั้งเป็นผู้ให้กำลังใจอย่างดี
อาจารย์วิชิต ศิริโชติ	ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนวทางในการทำโครงงานและเป็นผู้เร่งให้ทำเสร็จได้ทันเวลา และช่วยเหลือเวลามีปัญหาตลอดเวลา
อาจารย์อนุพงษ์ สรงประภา	ผู้ให้คำปรึกษา
นายเกรียงไกร กิตติวราวุฒิ	ผู้คอยให้ความช่วยเหลือตลอด ตั้งแต่เริ่มทำโครงงานนี้จนจบ
เพื่อนๆ ทุกคน	ที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือด้านอุปกรณ์เท่าที่ทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ลักษณะและการประยุกต์ใช้งานสัญญาณทรานเซียนท์	2
2.1.1 ตัวอย่างในการใช้งานสัญญาณทรานเซียนท์	3
2.2 ทฤษฎีการแซมปลิ้งแบบไนควิส	4
2.3 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน	6
2.3.1 องค์ประกอบในการทำงานและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น	6
2.3.2 วิธีการเลือกตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล	10
2.3.3 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน	11
2.4 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ	15
2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปของออปแอมป์	16
2.4.2 ลักษณะการทำงานของออปแอมป์	17
2.4.3 คุณสมบัติและพารามิเตอร์บางชนิดของออปแอมป์	19
2.4.4 การออกแบบวงจรคอมพาราเตอร์ (วงจรเปรียบเทียบ)	23
2.4.5 การออกแบบวงจรขยายไม่กลับเฟส	25
2.5 การวางอุปกรณ์ในวงจรดิจิตอลและการเกิดสัญญาณรบกวน	28
2.5.1 สัญญาณรบกวนในดิจิตอลลอจิก	31
2.5.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายใน	32
2.5.3 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกราวด์ของวงจรดิจิตอล	35
2.5.4 วิธีลดความเหนี่ยวนำในวงจร	36
2.5.5 ระบบกราวด์ที่เหมาะสมในวงจรดิจิตอล	38
2.5.6 การจ่ายพลังงาน	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบ	48
3.1 วงจรในแต่ละส่วน	48
3.2 คุณสมบัติของตัวอุปกรณ์	54
3.3 การทำงานในส่วนซอฟท์แวร์	55
บทที่ 4 ผลการวิจัย	60
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	67
ภาคผนวก	
ประวัติผู้จัดทำโครงงานพิเศษ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลชนิดต่างๆ	14
ตารางที่ 2 แสดงเวลาเปรียบเทียบกับแบนวิดธ์ในลอจิกดิจิตอลตระกูลต่างๆ	30
ตารางที่ 3 ค่าอิมพิแดนซ์ของวงจร	35
ตารางที่ 4 แสดงค่าผลความต่างของการเกิดสัญญาณรบกวนของ 2 วิธี	40
ตารางที่ 5 การเซ็ตจัมป์เบ่อร์ให้เหมาะสมกับอัตราการแซมปลิ้ง	50
ตารางที่ 6 แสดงช่วงเวลาสูงสุดในการแซมปลิ้งเก็บข้อมูล	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1-1 เป็นการแสดงฮาร์โมนิกของคลื่นสี่เหลี่ยมกับสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ในแต่ละความถี่ 3

รูปที่ 2.3-1 สัญญลักษณ์ของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 6

รูปที่ 2.3-2 กราฟระหว่างอนาลอกอินพุทและจำนวนระดับ 7

รูปที่ 2.3-3 กราฟของอนาลอกอินพุทกับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น 8

รูปที่ 2.3-4 แสดงการตอบสนองของเวลาแปลงสัญญาณของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล 9

รูปที่ 2.3-5 รูปสัญญาณเพี้ยนเกิดขึ้นเมื่ออัตราแซมเป้ลต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับคาบเวลาของสัญญาณอินพุท 10

รูปที่ 2.3-6 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน 11

รูปที่ 2.3-8 วงจรอนาลอกอินพุทของตัวแปลงสัญญาณแบบแฟรชทั่วไป 14

รูปที่ 2.4-1 บล็อคไดอะแกรมของวงจรภายในออปแอมป์ 16

รูปที่ 2.4-2 แสดงสัญญลักษณ์ทั่วไปของออปแอมป์ 17

รูปที่ 2.4-3 ลักษณะการทำงานของออปแอมป์แบบต่างๆ 18

รูปที่ 2.4-4 ความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ในออปแอมป์ 19

รูปที่ 2.4-5 วงจรใช้ปรับค่าออฟเซ็ทให้เป็นศูนย์ 20

รูปที่ 2.4-6 แสดงวงจรที่ใช้ออปแอมป์เป็นคอมพาราเตอร์ 23

รูปที่ 2.4-7 เอาท์พุทที่ได้หลังจากที่สลับขั้วไดโอดจากรูปที่ 2.4-6 24

รูปที่ 2.4-8 การใช้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรคอมพาราเตอร์ 25

รูปที่ 2.4-9 การออกแบบวงจรขยายไม่กลับเฟสสำหรับไฟกระแสสลับ 27

รูปที่ 2.5-1 ระบบดิจิตอลลอจิกอย่างง่าย 32

รูปที่ 2.5-2 รูปคลื่นแรงดันเอาท์พุท 33

รูปที่ 2.5-3 เกทที่มีเอาท์พุทเป็นแบบโทเทมโพล 34

รูปที่ 2.5-4 กราฟค่าความเหนี่ยวนำรวมของตัวนำ 2 ตัว ที่วางห่างกันในระยะต่างๆ 38

รูปที่ 2.5-5 การวางกราวด์ในวงจรแบบตาราง 39

รูปที่ 2.5-6 กระแสของแหล่งจ่ายไฟ ที่มีตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งและที่ไม่มี 42

รูปที่ 2.5-7 การวางตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.5-8 แสดงค่าอิมพิแดนซ์ของการต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง 46

รูปที่ 3.1-1 แสดงวงจรหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละส่วน 49

รูปที่ 3.1-2 แสดงรูปตัวเคาท์เตอร์ 51

รูปที่ 3.1-3 แสดงหลักการใช้โวลท์เตจดีไวด์เดอร์ 52

รูปที่ 3.1-4 หลักการออกแบบตัวควบคุมซอฟท์แวร์ 53

รูปที่ 3.3-1 การทำงานในส่วนซอฟท์แวร์ 55

รูปที่ 3.3-2 ขั้นตอนการทำงานหลักๆ ของส่วนซอฟแวร์ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

เครื่องมือวัดในปัจจุบันนี้มีมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งใช้หลักการทางฟิสิกส์ในการวัดที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสิ่งที่เราต้องการวัด ซึ่งถ้าเราต้องการศึกษาวัตถุที่มีสภาพการดูดซับแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกัน ควรใช้เครื่องรังสีเอกซ์ (x-rays) รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจการทะลุทะลวงสูงฉายลงบนวัตถุ โดยมีฟิล์มหรือตัวตรวจจับ (sensor) อยู่อีกข้างหนึ่งของวัตถุ เพื่อวัดความเข้มของคลื่นที่ทะลุผ่านออกมา ทำให้เราทราบถึงสภาพภายในของวัตถุ จากความเข้มที่ทะลุผ่านออกมาจะสามารถดูได้ว่าความสามารถในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในวัตถุนั้นมีความแตกต่างกันอย่างไร ถ้าทำการฉายวัตถุในแต่ละมุม วัตถุที่ดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้น้อยจะไม่สามารถใช้เครื่องรังสีเอกซ์ได้ แต่หากเราต้องการศึกษาสมบัติการสะท้อนของวัตถุเมื่อคลื่นเคลื่อนที่กระทบกับรอยแตกหัก หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการดูดกลืนคลื่น เมื่อตรวจจับคลื่นที่สะท้อนกลับออกมาก็จะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของรอยแตกหักว่าเป็นเช่นไร และหากนำข้อมูลการสะท้อนที่ได้ในแต่ละจุดมาสร้างเป็นภาพก็จะทำให้เห็นถึงสภาพภายในของวัตถุได้ เครื่องอัลตราซาวด์ (ultrasound) ในปัจจุบันมีประโยชน์มากในด้านการแพทย์ เช่นการตรวจทารกในครรภ์ หรือใช้ตรวจหามะเร็งเป็นต้น

เครื่องอัลตราซาวด์ ที่ใช้งานนี้จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่หนึ่งส่วนคือ ส่วนตรวจจับสัญญาณการสะท้อนซึ่งจะเป็นส่วนบันทึกข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์นั่นเอง แต่เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic) เป็นคลื่นกลที่มีความถี่สูงทำให้ส่วนบันทึกรูปสัญญาณสะท้อนที่กลับไปกลับมานั้น จะต้องมีความถี่สูงด้วยเช่นกันมี (อัตราการบันทึกสัญญาณเป็น 2 เท่าของความถี่ที่บันทึกเป็นอย่างน้อย) ด้วยเหตุนี้เอง การออกแบบเครื่องบันทึกสัญญาณนี้จะต้องออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อที่จะทำให้ตรวจจับคลื่นความถี่สูงได้

ในโครงงานนี้เป็นการศึกษาและสร้างเครื่องบันทึกสัญญาณที่มีความถี่สูงได้ โดยมีความถี่สูงสุดในการบันทึกสัญญาณ 10 เมกกะเฮิรทซ์ (MHz) เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) ทั่วไปที่ใช้งานมีความเร็วในการทำงานช้ากว่าอัตราการเก็บสัญญาณที่ตั้งเอาไว้มาก จึงต้องใช้วิธีการเก็บสัญญาณด้วยความเร็วสูงเข้ามาไว้ในหน่วยความจำ (memory) แล้วจึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นตัวย้ายข้อมูลที่บันทึกไว้ขึ้นไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป ตัวบันทึกสัญญาณนี้สามารถนำไปใช้กับตัวตรวจจับ เพื่อใช้ในการเก็บรูปสัญญาณต่างๆได้ เช่น ใช้ในการเก็บสัญญาณภาพ โดยติดอยู่กับกล้องแล้วส่งข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์ ตัวหลักที่เป็นตัวจ่ายข้อมูลไปยังส่วนต่างๆหรืออาจจะใช้เป็นตัวบันทึกสัญญาณทางฟิสิกส์ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเพื่อนำไปวิเคราะห์เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

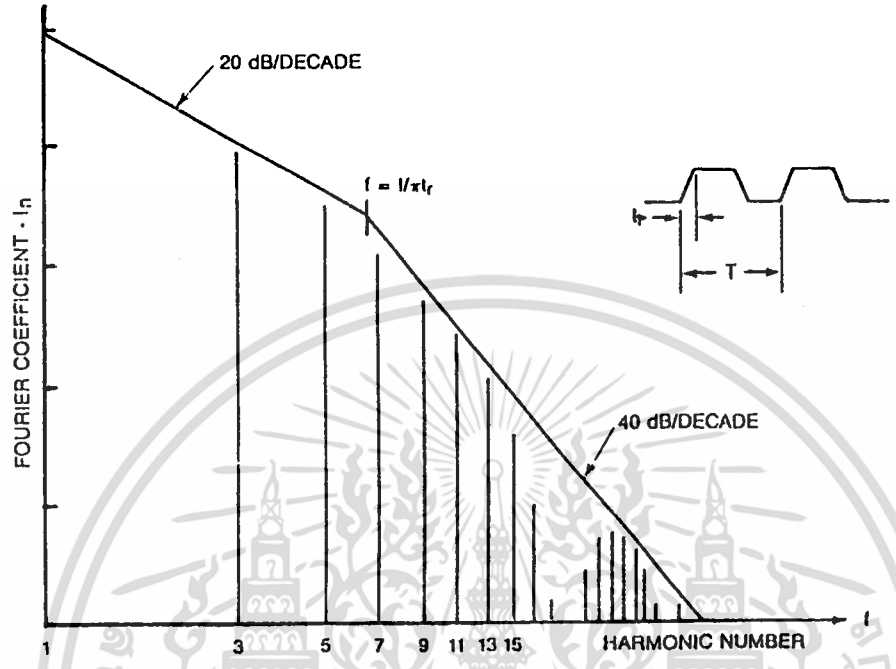
บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะและการประยุกต์ใช้งานสัญญาณทรานเซียนท์

เครื่องมือวัดบางชนิดที่ใช้กันทั่วไปนั้น ในการวัดสัญญาณก็เป็นการวัดค่าเฉลี่ยของสัญญาณ เช่น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multi Meter ,DMM) เมื่อเราบิดเลือกช่องแรงดันกระแสสลับ ก็จะเป็นการวัดค่าVrms ของสัญญาณ ข้อมูลที่ได้ก็ไม่สามารถบอกลงไปในรายละเอียดมากยิ่งขึ้น จึงต้องใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) จับสัญญาณเพื่อที่จะให้รู้ว่าสัญญาณที่ให้ค่าเฉลี่ยนั้นมีรูปร่างเป็นอย่างไร โดยอัตราการแซมปลิ้งสัญญาณของออสซิลโลสโคปจะต้องมีค่าสูงกว่าสัญญาณอินพุท 2 เท่าเป็นอย่างน้อย ถ้าสัญญาณอินพุทที่เข้ามาเป็นสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่เดียวคงไม่เป็นปัญหาอะไร แต่ถ้าเป็นสัญญาณอื่นเมื่อใช้ฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ออกมาจะได้สัญญาณรูปซายน์ หลายๆความถี่ และในความถี่ก็จะมีแอมปลิจูดแตกต่างกันไป เราจะทราบได้อย่างไรว่าสัญญาณที่เราตรวจจับมาได้นั้นเป็นรูปสัญญาณแท้จริงที่เข้ามา

สัญญาณทรานเซียนท์ก็เป็นสัญญาณชนิดหนึ่งที่มีปัญหาในการตรวจจับ เพราะสัญญาณทรานเซียนท์เป็นสัญญาณที่ประกอบด้วยสัญญาณความถี่สูงจำนวนมากมารวมกัน และรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นก็เกิดเพียงชั่วขณะซึ่งไม่สามารถทำให้รูปสัญญาณเกิดได้เหมือนเดิมได้อีก ด้วยเหตุนี้การที่จะจับสัญญาณทรานเซียนท์แล้วนำไปวิเคราะห์ได้นั้น ตัวเครื่องมือที่ใช้ตรวจจับจะต้องมีอัตราการแซมปลิ้งของสัญญาณที่สูง และสามารถบันทึกรูปสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งที่เราต้องการได้ ในส่วนของการบันทึกสัญญาณก็คงไม่มีปัญหาเท่าใดนัก เนื่องจากราคาของสแตติกแรม (static RAM) ในปัจจุบันนี้มีราคาถูกและมีความจุสูง แต่ในส่วนของอัตราการแซมปลิ้ง เราทราบได้อย่างไรว่าเครื่องมือของเรามีอัตราการแซมปลิ้ง ที่เหมาะสมกับสัญญาณ เราจะต้องทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้อนุกรมฟูริเยร์ เพื่อที่จะดูว่าในองค์ประกอบของสัญญาณอินพุทนั้นมีความถี่สูงที่สุดที่เท่าใดและอัตราการแซมปลิ้ง ของเครื่องมือมีค่ามากกว่าเป็น 2 เท่าหรือไม่ ถ้าความถี่สูงสุดในองค์ประกอบของสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการแซมปลิ้งเป็น 2 เท่าแล้วก็จะทำให้เราเก็บสัญญาณเข้ามาได้หมดโดยมีรูปแบบเหมือนกับสัญญาณอินพุทที่เข้ามา แต่ในกรณีของสัญญาณคลื่นลูกสี่เหลี่ยม (Square Wave) นั้นถ้าทำการกระจายความถี่ออกมาจะพบว่ามีความถี่ถึงอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถสร้างเครื่องมือที่มีความถี่สูงขนาดนั้นได้ ด้วยเหตุนี้เราจึงจำเป็นต้องมาพิจารณาว่าในองค์ประกอบความถี่ค่าเท่าใด ที่เราสามารถตัดทิ้งได้โดยที่ไม่ทำให้รูปของสัญญาณโดยรวมมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากการศึกษาแล้วพบว่า ถ้าสัญญาณที่มีขนาดสูงกว่า 40 dB/decade จะสามารถตัดทิ้งได้ โดยความถี่ที่เหลือเมื่อนำมารวมกันแล้วไม่ทำให้รูปสัญญาณผิดเพี้ยนไปมากเท่าใดนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1-1 เป็นการแสดงฮาร์โมนิกของคลื่นสี่เหลี่ยมกับสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ ในแต่ละความถี่

จะพบว่าฮาร์โมนิกที่มีสัมประสิทธิ์ต่ำกว่า 40 dB/decade จะมีผลทำให้รูปคลื่นโดยรวมเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

2.1.1 ตัวอย่างในการใช้งานสัญญาณทรานเซียนท์

ในอดีตนั้นการเก็บสัญญาณที่มีความถี่สูงนั้นทำได้ลำบาก เนื่องจากอุปกรณ์ที่จะนำมาทำเครื่องมือนั้นหายากและมีราคาแพง แต่ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านเซมิคอนดัคเตอร์ (semiconductor) ได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้การเก็บสัญญาณความถี่สูงไม่ใช่เรื่องยากอีกต่อไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้สัญญาณทรานเซียนท์เป็นตัวตรวจสิ่งที่เราสังเกตุ คลื่นอัลตราโซนิคก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของสัญญาณทรานเซียนท์ ที่เราสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย

คลื่นอัลตราโซนิคเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูของมนุษย์จะได้ยิน โดยมีความถี่สูงกว่า 18 กิโลเฮิรทซ์ (kHz) ซึ่งมีคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นเหมือนกับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ โดยจะมีคุณลักษณะที่น่าสนใจดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คลื่นที่มีความถี่สูงกว่าจะมีความยาวคลื่นสั้นกว่า คุณสมบัติข้อนี้จะกล่าวว่าสิ่งกีดขวางที่จะทำให้เกิดการกระเจิง หรือการเบี่ยงเบนจะต้องมีขนาดเล็กลงให้เหมาะสมกับความยาวคลื่น ซึ่งเป็นการง่ายที่เราจะควบคุมทิศทางและความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิค

2. คลื่นอัลตราโซนิค สามารถวิ่งผ่านเข้าไปในภาชนะโลหะหรือท่อได้ จากคุณสมบัติข้อนี้เองที่นำไปใช้ทำเครื่องมือตรวจสอบพื้นผิวภายนอก จนเข้าไปถึงของไหลภายในได้โดยไม่ทำลายวัสดุ (non-invasive) และมีส่วนสำคัญในการตรวจสอบของไหลที่มีคุณสมบัติดังนี้ กัดกล่อนได้ดี, แผ่คลื่นวิทยุได้, มีการระเบิดหรือติดไฟได้ โดยไม่ทำให้สารที่ตรวจสอบมีความสกปรก

3. คลื่นอัลตราโซนิค สามารถเคลื่อนที่หรือแพร่เข้าไปในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ มีประโยชน์ในทางการแพทย์

4. นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติที่เป็นความลับ โดยใช้งานในด้านการทหารอีกด้วย

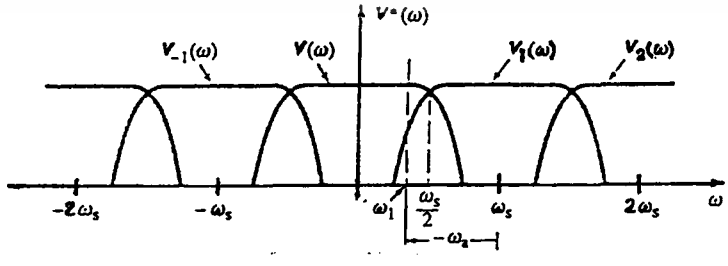
เห็นได้ว่าสัญญาณทรานเซียนท์นั้นมีประโยชน์ในหลายๆด้าน อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการพัฒนาเครื่องมือวัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.2 ทฤษฎีการแซมปลิ้งของไนควิส (Nyquist theorem)

ทฤษฎีการแซมปลิ้งกล่าวถึงหลักการที่จะทำให้ได้สัญญาณ V(t) จากสัญญาณ $V^*(t)$ ถ้าความถี่ในการแซมปลิ้ง (Ws) มีค่าไม่สูงมากกว่า 2 เท่าของความถี่ที่สูงที่สุดของสัญญาณ V(w) แล้ว แถบของความถี่ที่เลื่อนไปของ V(w) จะเกิดการเหลื่อมซ้อนกันดังรูปที่ 2.2-1 ไม่สามารถแยกได้ด้วยการกรองสัญญาณหลักการของ Nyquist ในการเก็บสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องคือ

$$Ws > 2Wh$$

เมื่อ W(h) คือ องค์ประกอบที่มีความถี่สูงสุดของสัญญาณ V(w) ซึ่งสัญญาณที่ถูกเก็บจากการ แซมเปิ้ล จะต้องมีองค์ประกอบของความถี่ที่สูงที่สุดน้อยกว่า ความถี่ไนควิสหรือ Ws/2



รูปที่ 2.2-1 แถบที่เกิดการซ้อนกันขึ้นของ V(w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายองค์ประกอบความถี่ที่เป็นลบของ V(w) คือ จะมีสัญญาณกลับกันจากส่วนที่เป็นองค์ประกอบที่เป็นบวกไป 180^0 เนื่องจากสเปคตรัมความถี่ของ V(w) จะมีความสมมาตรรอบ W = 0 จึงทำให้มันเป็น ฟังก์ชันคู่และ V(-w) = V(w) อย่างไรก็ตามเฟสสามารถเป็นฟังก์ชันคี่และลบได้ ถ้า W<0 สำหรับสัญญาณลบ n มุม C_n สามารถหาได้จากสมการ

$$Cn = \frac{1}{Ts}\int_{-Ts/2}^{Ts/2} v(t)e^{-jnw_s t}\,dt$$

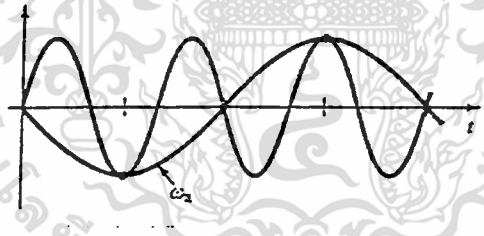
ได้ผลลัพธ์เป็น V = -nwst เมื่อ V(-n) = - V(n)

เครื่องหมายของความถี่เสมือนในไทม์โดเมน (time domain) ที่เป็นลำดับของการแซมเปิ้ล จะมีองค์ประกอบความถี่เดียวที่ W = 3/4Ws สัญญาณที่แซมเปิ้ลได้จะเป็นสัญญาณรูปซายน์ (sinusoid) W = 1/4Ws สำหรับความถี่เสมือนที่อยู่ในแถบ ของ V(w) สัญญาณรูปซายน์ เสมือนจะกลับกับ V_1 เพราะว่าความถี่ของมันมีค่าเป็นลบ

ในกรณีทั่ว ๆ ไป ถ้า W_1 ของ V(w) ถูกแซมเปิ้ล ที่ W(s) ดังนั้นจะได้

W_1 = Ws- (-Wa) = Ws+Wa

และความถี่เสมือน = Wa =W1-Ws



รูปที่ 2.2-2 สัญญาณรูปซายน์ของความถี่สองค่าที่มีการแซมเปิ้ลไม่เหมือนกัน

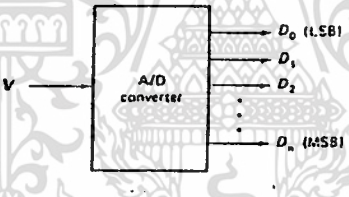
ในรูปที่ 2.2-2 สัญญาณรูปซายน์ ของทั้ง W_1 ที่ V และ Wa ของ V_1 จะเป็นเวลาแซมเปิ้ล ที่ทับกันพอดี การแซมเปิ้ลที่ไม่ต่อเนื่องของ V(t) จะมีการแซมเปิ้ลที่น้อยเกินไปที่จะทำการตรวจจับ Wa v(t) คือสัญญาณที่ได้จากการแซมเปิ้ลตามทฤษฎีการแซมปลิ้ง จะต้องมีการแซมเปิ้ลมากกว่า 2 จุด ต่อ 1 ลูกคลื่นของ v(t) มิฉะนั้นแล้ว v(t) ที่ได้จะเป็นโอเวอร์แซมเปิ้ล.

การแก้ไขสัญญาณ V(w) ที่ได้จาก $V^{\cdot}(w)$ เนื่องจากการโอเวอร์แซมเปิ้ล สามารถใช้โลพาสฟิวเตอร์ (low-pass filter, LPF) ได้ ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ผ่านได้มีความถี่เดียวคือ V(w) โดยจะตัดสัญญาณความถี่ที่สูงกว่า Wh โดยทันที ซึ่งวงจรกรองสัญญาณในอุดมคติที่มีความกว้างมากที่สุดจะต้องตัดสัญญาณที่ความถี่ไนควิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน (Flash converter)

การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยการใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (analog to digital converter ADC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เมื่อใส่แรงดันหรือกระแสให้มันอย่างต่อเนื่องแล้ว มันจะเปลี่ยนปริมาณของกระแสหรือแรงดันทำให้เกิดเอาท์พุทเป็นรหัสออกมา ซึ่งรหัสนี้จะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณอินพุท โดยอุปกรณ์นี้จะเป็นระบบดิจิตอล และมีสัญญาณในการแฮนด์เชคคิ้ง (handshaking) กับอุปกรณ์ภายนอกอยู่ 2 สัญญาณ สัญญาณแรกจะเป็นสัญญาณที่บอกเริ่มการแปลงค่า และเมื่อการแปลงค่าเสร็จสิ้นแล้ว จะมีการส่งสัญญาณที่สองเพื่อบอกการสิ้นสุดการแปลงค่า โดยลักษณะการทำงานจะมีเอาท์พุทอิเนเบิลเป็นตัวบอกสถานะเอาท์พุทที่ปรากฏอยู่ ถ้าเอาท์พุทอิเนเบิลไม่ทำงาน สัญญาณเอาท์พุทจะอยู่ในสถานะอิมพีแดนซ์สูง (high-impedance) และคล็อคจะเป็นตัวให้เวลาอ้างอิงกับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล จากรูปที่ 2.3-1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล วงจรนี้จะผลิตเอาท์พุทแบบไบนารี่ n บิต ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนกับแรงดันอินพุท



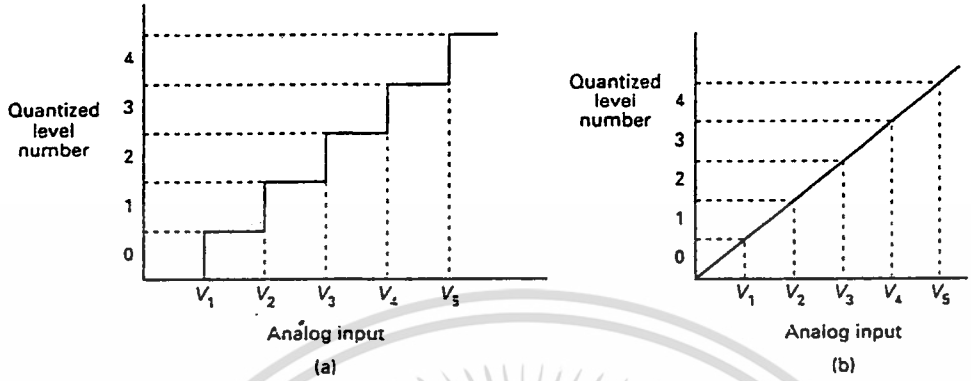
รูปที่2.3-1 สัญญลักษณ์ของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

การเลือกตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ที่สำคัญจะต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดในการแปลงและวิธีการแปลงสัญญาณอนาลอก เพื่อที่จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

2.3.1 องค์ประกอบในการทำงานและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ความยาวของสัญญาณอนาลอก ที่ต้องการเปลี่ยนเป็นรหัสดิจิตอลนั้นมีได้ไม่จำกัด โดยความยาวของรหัสดิจิตอลจะแสดงอยู่ในระดับ(level) ซึ่งแต่ละระดับก็จะมีจำนวนรหัสดิจิตอลได้จำกัด และจำนวนระดับเองก็จะมีได้จำกัดเช่นกัน เราจะเปลี่ยนจากอนาลอกเป็นรหัสดิจิตอลโดยการแบ่งสัญญาณอนาลอกลงในแต่ละระดับ ช่วงของอนาลอกที่ใส่ลงในแต่ละระดับนี้เราเรียกว่า "ควอนไทเซชั่น"(quantization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3-2 กราฟระหว่างอนาลอกอินพุทและจำนวนระดับ

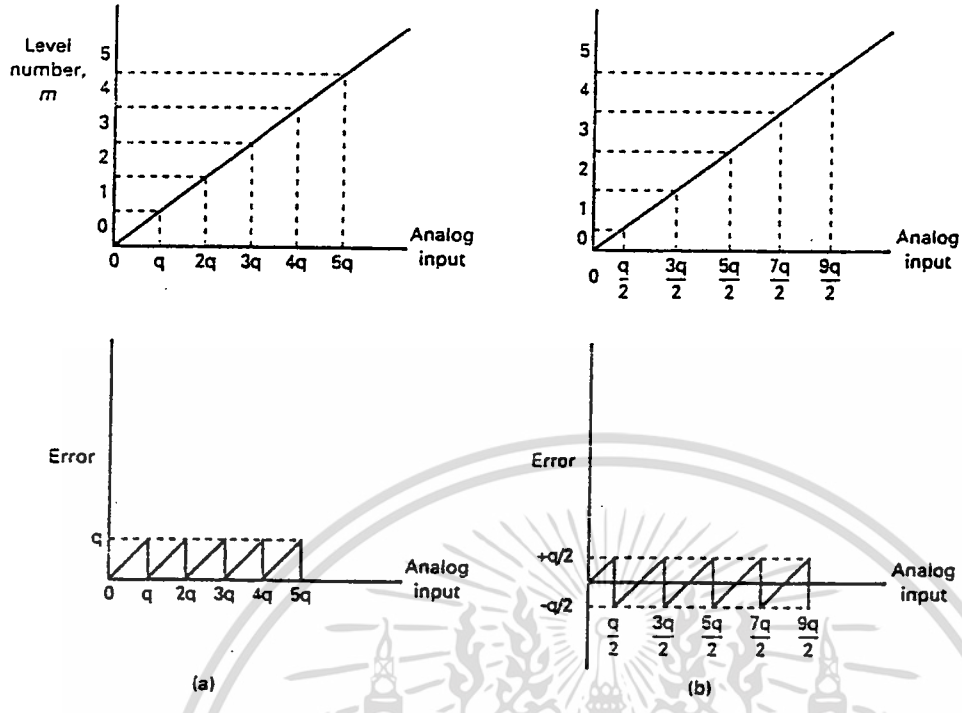
จากรูปที่ 2.3-2(a) จะแสดงให้เห็นถึงควอนไทเซชั่น โดยถ้าอินพุทมีค่าตั้งแต่ 0-V_1 แล้วสัญญาณนี้จะอยู่ที่ระดับ 0 และถ้าสัญญาณอยู่ระหว่าง V_1 และ V_2 แล้วสัญญาณจะอยู่ที่ระดับ 1 ถ้าความกว้างในแต่ละระดับเท่ากันดังรูปที่ 2.3-2(b) จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุท และจำนวนระดับได้โดยความกว้างของระดับ เราจะให้เป็นช่วงกว้างควอนไทเซชั่น (quantization interval) หรือ q ซึ่งค่านี้เรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่จะพบความแตกต่าง (LSB value) จากรูปที่ 2.3-2(a) และ 2.3-2(b) ค่า ช่วงกว้างควอนไทเซชั่น หรือ q จะเท่ากับ V_1

ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นรหัสดิจิตอลนั้น รหัสดิจิตอลจะบอกระดับที่อนาลอกนั้นอยู่ เช่น ถ้าการแปลงสัญญาณอนาลอกนั้นอยู่ระหว่างระดับ 3 และระดับ 4 แล้ว เอาท์พุทของรหัสดิจิตอลคือเลข 3 แต่ในการใช้หมายเลขระดับนี้จะทำให้เกิดค่าที่ไม่ถูกต้องขึ้นได้ เรียกว่าการเกิดข้อผิดพลาดควอนไตร์ (quantization error) โดยค่าความผิดพลาดนี้ดูได้จากรูปที่ 2.3-3

การเกิดข้อผิดพลาดควอนไตร์ หรือ QE ที่มีขนาด N บิต คือ

$$QE = q/2 = \frac{v_{\max}}{2^{N+1}} \qquad (2\text{-}1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3-3(a) ข้อผิดพลาดควอนไตร์ของ q **รูปที่ 2.3-3(b)** ข้อผิดพลาดควอนไตร์ของ q/2

รูปที่ 2.3-3 กราฟของอนาลอกอินพุท กับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

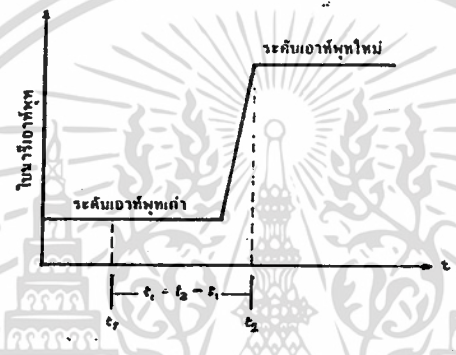
ค่าความผิดพลาด สามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของค่าสัญญาณอนาลอกที่แท้จริง และค่าที่แสดงจากเลขระดับ โดยเลขระดับ m จะให้เป็น mq ในรูปที่ 2.3-3(a) ซึ่งอยู่ในระดับ 0 จะแสดงค่าอนาลอกที่ 0 และค่าความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง q เมื่อสัญญาณอนาลอกเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง q แล้วเลขระดับจะเท่ากับ 1 โดยค่าความผิดพลาดที่จุดนี้จะตกลงมาที่ศูนย์ แต่มันจะเพิ่มขึ้นจนถึง q เมื่ออินพุทเพิ่มขึ้นจาก q ถึง 2q เพราะฉะนั้นค่าความผิดพลาดมากที่สุดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ q

แต่ถ้าช่วง ควอนไทเซชั่น ลดลงมาเป็น q/2 หรือ 1/2 LSB แล้วจะได้ค่าความผิดพลาดมากที่สุดจะเท่ากับ q/2 ดังรูปที่ 2.3-3(b) เพราะฉะนั้นถ้าเราต้องการให้มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด เราจะต้องพยายามทำให้มีช่วงกว้างของควอนไทเซชั่นน้อยที่สุด ส่วนในกรณีที่ตัวแปลงมีเรสโซลูชั่นสูงๆ (อินพุทบิตมาก) ความกว้างสูงสุดของข้อผิดพลาดจะลดลงตามบททฤษฎี และถ้าเป็นตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลในอุดมคติจะต้องมีเอาท์พุทมากจนนับไม่ได้ (infinity) ดังนั้นจะมีค่าเรสโซรูชั่นถึงอินฟินิตี้ และจะทำให้กราฟรูปที่ 2.3-3(b) แกนตั้งเป็น 0 แต่ไม่มีทางเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติ ข้อผิดพลาดที่เกิดจากเรสโซรูชั่นที่จำกัดนี้เราเรียกว่าข้อผิดพลาดควอนไตร์

เอาท์พุทของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลก็คือระดับอินพุท ซึ่งจะคงที่ในเวลาหนึ่ง สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่า ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลทำงานโดยการแซมเปิ้ลปริมาณของสัญญาณอนาลอกและต้องแน่ใจว่าสัญญาณจะคงที่ ณ ช่วงเวลานั้น เราจึงต้องมีวงจรสำหรับค้างค่า (hold) ของสัญญาณ จึงทำให้เรานิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้วงจรแซมเปิ้ลและโฮลด์ (sample and hold circuit) เพื่อแน่ใจว่าปริมาณของอินพุทจะไม่เปลี่ยนขณะที่กำลังทำการแปลงสัญญาณ เวลาในการแปลงสัญญาณและอัตราการแซมเปิ้ล (sample) เป็นปัจจัยในการพิจารณาอย่างมาก เวลาในการแปลงสัญญาณ (conversion time) t_c คือเวลาที่ช้าไประหว่างที่อินพุทเข้ามาจนถึงการแสดงค่าของไบนารี่เอาท์พุท ในกรณีที่เอาท์พุทจะเริ่มเปลี่ยนจาก O ไปถึงค่าที่มากที่สุด ในรูปที่ 2.3-4 เป็นตัวอย่างของเวลาหน่วง (time delay)

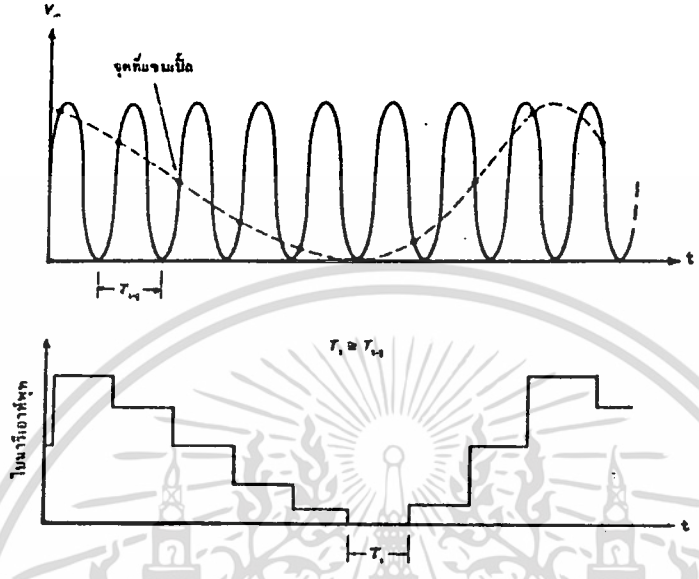


รูปที่ 2.3-4 แสดงการตอบสนองของเวลาแปลงสัญญาณ (conversion time) ของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

อินพุทที่เข้าไปในคอนเวอร์เตอร์จะอยู่ ณ เวลา t_1 และสัญญาณตอบสนองอยู่ ณ t_2 ผลต่างของเวลาทั้งสอง ก็คือเวลาแปลงสัญญาณ t_c เวลาแปลงสัญญาณเป็นอัตรามากที่สุดซึ่งสัญญาณถูกแซมเปิ้ล ช่วงเวลาของการแซมเปิ้ล เรียกว่าเวลาแซมเปิ้ล (sample time) อัตราแซมเปิ้ลใช้ช่วงในการบอกเวลาแซมเปิ้ล เพื่อให้ทราบถึงผลของการแซมเปิ้ลบนสัญญาณอินพุทอนาลอกไปเป็นปริมาณดิจิตอล โดยถ้าเราเพิ่มอัตราการแซมเปิ้ลและเพิ่มเรสโซรูชั่น (จำนวนเอาท์พุทบิต) ให้มากขึ้นก็จะได้เอาท์พุทที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอนาลอกจากอินพุทมากขึ้น

ปัญหาอีกอย่างหนึ่งก็คือ ถ้าอินพุทเปลี่ยนแปลงระดับอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอัตราแซมเปิ้ลแล้วตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสัญญาณได้อย่างถูกต้องและจะเกิดการเพี้ยนของสัญญาณ ปัญหาเช่นนี้สามารถแสดงให้เห็นจากระบบเวลาแซมเปิ้ล (time sample system) เช่น ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล อัตราความถี่ของการแซมเปิ้ลต้องอย่างน้อย 2 ครั้งต่อหนึ่งลูกคลื่นของสัญญาณอินพุท การกำหนดความถี่ในการแซมเปิ้ลแบบนี้ ก็คือทฤฎีไนควิสต์แซมเปิ้ล (nyquist sampling theorem) นั่นเอง แต่ถ้าเราไม่ทำตามทฤษฎีไนควิสต์แล้ว เอาท์พุทของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล จะผิดเพี้ยนตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3-5 การเพี้ยนเกิดขึ้นเมื่ออัตราแซมเปิ้ลต่ำเกินไป
เมื่อเทียบกับคาบเวลาของสัญญาณอินพุท

เพราะฉะนั้นในการหลีกเลี่ยงความผิดเพี้ยน (alias) ของเอาท์พุทที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ในการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุทเร็วๆ เราควรที่จะใช้การแซมเปิ้ลแบบความเร็วสูงเพื่อจะให้ได้ความถูกต้องมากขึ้น

2.3.2 วิธีการเลือกตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล มีดังนี้

1. จำนวนบิต

จำนวนบิตที่ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลให้เอาท์พุทออกมานั้น เป็นสิ่งสำคัญที่เราจะเลือกใช้ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยจำนวนบิตหรือ N เป็นตัวบอกถึงข้อผิดพลาดควอนไตร์ (โดยทั่วไปควรเลือกให้มีจำนวนบิต มากกว่าความละเอียดที่เราต้องการ 1 หรือ 2 บิต)

2. เวลาในการแปลงค่า

ช่วงเวลาในการแปลงค่า คือช่วงเวลาที่เริ่มการแปลงข้อมูล (start conversion pulse,SC) จนถึงจุดสิ้นสุดการแปลงข้อมูล (EOC) โดยส่วนใหญ่แล้วช่วงเวลาในการแปลงค่าจะดูจาก50เปอร์เซ็นต์ ของการเริ่มเปลี่ยนสถานะ และ50เปอร์เซ็นต์ ของจุดสิ้นสุดการแปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขนาดของอนาลอกน้อยที่สุดที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง(Quantum interval หรือLSB value)

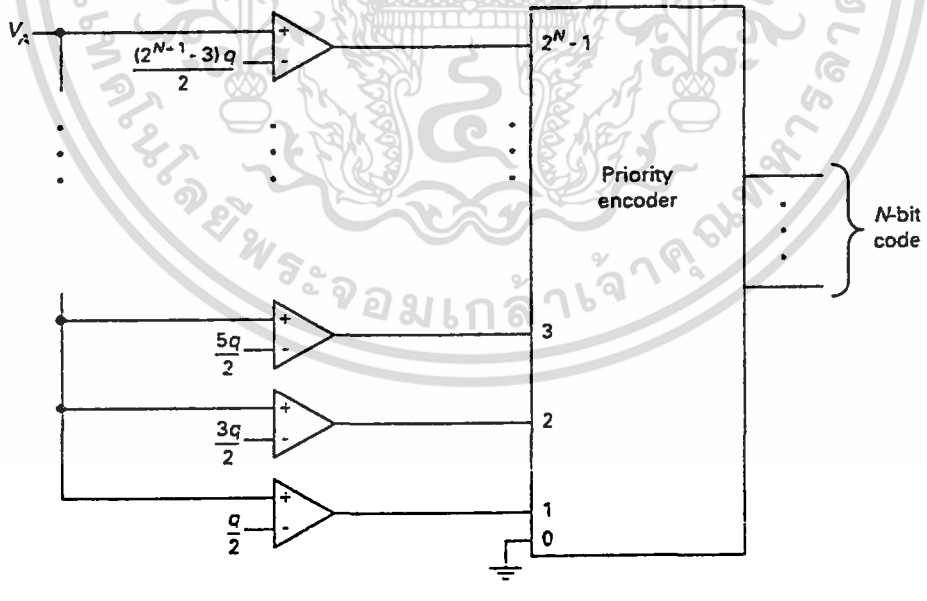
ช่วงกว้างควอนตัม(Quantum interval หรือ LSB value) คือขนาดอินพุทของอนาลอกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรหัสทางดิจิตอล ซึ่งค่านี้จะมีผลต่อข้อผิดพลาดควอนไตร์ คือถ้าจะทำให้มีการเกิดการผิดพลาดน้อย ก็ต้องพยายามทำให้ช่วงกว้างควอนตัมมีค่าน้อยด้วย

4. ความถูกต้อง

ถ้ารวมข้อผิดพลาดควอนไตร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm$ q/2 และค่าความผิดพลาดอื่นๆ ที่เกิดเนื่องมาจากความเป็นเชิงเส้น (linearity), ออฟเซ็ต (offset), หลายชั้น (multilayer) และ เต็มสเกล (full-scale) แล้วโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ $\pm$ 1LSB หรือ $\pm$q

2.3.3 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน (parallel converter)

ถ้าเราคำนึงในด้านความเร็วในการแปลงสัญญาณเป็นอันดับแรก เราควรจะใช้วิธีการตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน (บางทีอาจเรียกว่า flash คอนเวอร์เตอร์) วิธีนี้เป็นการป้อนอินพุทพร้อมๆ กันเข้าไปในกลุ่มของคอมพาราเตอร์ที่ต่อแบบขนาน ซึ่งแต่ละตัวก็จะทำหน้าที่ของมัน โดยเขียนหลักการทำงานง่ายๆ ของมันได้ดังรูปที่ 2.3-6



รูปที่2.3-6 ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนานนี้ มีแรงดันอยู่ 2^N-1 ระดับ โดยระดับต่ำสุดอยู่ที่ q/2 ถัดขึ้นไปคือ 3q/2, 5q/2, 7q/2, ..., $(2^{N+1}-3)q/2$ จากรูปที่ 2.3-6 นั้น เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์(ตัวเปรียบเทียบ) ทุกตัวจะเป็น 0 แล้วคอมพาราเตอร์ตัวแรกจะเป็น 1 ได้เมื่อสัญญาณอนาลอกที่เราใส่เข้าไปเกินค่าของ q/2 ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงอยู่ โดยตัวแปลงสัญญาณตัวนี้จะมีเส้นอินพุท 2^N เส้น จาก 0 ถึง 2^N-1 ถ้ามีเส้นอินพุทใดทำงานแล้ว เส้นอินพุทที่เหลือก็จะไม่ทำงาน อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นรหัสไบนารี่ ให้สอดคล้องกับอินพุทที่ได้รับเข้ามา ถ้า V_{Amax} เป็นค่าแรงดันอินพุทมากที่สุดที่จะถูกแปลงสัญญาณแล้ว ช่วงกว้างควอนตัม สามารถคำนวณได้จาก

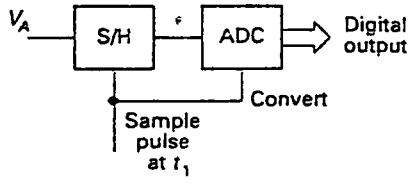
$$q = \frac{V_{A\max}}{2^N - 3/2} \qquad (2\text{-}2)$$

ถ้าเราใส่ค่าแรงดันอินพุทเท่ากับ V_A ไปที่คอมพาราเตอร์แล้ว แรงดันอ้างอิงที่คอมพาราเตอร์ จะต้องน้อยกว่าค่า V_A จึงจะทำการเข้ารหัส แต่ถ้าคอมพาราเตอร์ที่มีแรงดันอ้างอิงสูงกว่า V_A มันจะไม่สามารถรับอินพุทเพื่อไปทำการเข้ารหัสได้

เมื่อแรงดันอินพุทมีการเปลี่ยนระดับแล้ว รหัสเอาท์พุทที่เกิดขึ้นจะตอบสนองต่ออินพุทที่เข้ามาเมื่อเวลาผ่านไปช่วงสั้นๆ โดยเวลาที่เกิดขึ้นก่อนการตอบสนองนี้เรียกว่าเวลาหน่วงของคอมพาราเตอร์ สัญญาณการแปลงข้อมูลหรือสัญญาณการเริ่มต้นแปลงข้อมูลก็ต้องนำมาใช้ในการหาช่วงเวลาในการแปลงข้อมูลที่ถูกต้องด้วย เพราะเหตุนี้เนื่องจากต้องใช้เวลาในการแปลงข้อมูลจึงอาจจะทำให้เกิดรหัสเอาท์พุทที่มีความผิดพลาดขึ้นได้ ช่วงเวลาที่เกิดการผิดพลาดนี้เรียกว่าทรานเซียนท์

การกำจัดปัญหาเนื่องจากทรานเซียนท์ ของเอาท์พุทจะมีวิธีแก้ไขอยู่ 2 วิธี คือ

1. เพิ่มส่วนของวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่า (sample and hold circuit) ระหว่างสัญญาณอนาลอก V_A และอินพุทของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ณ ช่วงเวลาปัจจุบัน ดังรูปที่ 2.3-7



รูปที่ 2.3-7 การวางวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่า ในการแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแซมเปิ้ลพัลส์ ถูกป้อนเข้าไปในวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่าแล้ว ค่าเอาท์พุทที่เกิดขึ้นจะต้องให้ค่าแรงดันเหมือนกับแรงดันอินพุท เมื่อแรงดันอินพุทเปลี่ยนเอาท์พุทจะต้องคงที่เช่นเดิม จนกว่าแซมเปิ้ลพัลส์ลูกใหม่จะมาป้อนให้กับวงจรแล้ว เอาท์พุทที่เกิดขึ้นจึงจะเปลี่ยนตามแรงดันอินพุท ถ้าแซมเปิ้ลพัลส์ถูกป้อนเข้าไปในวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่าแล้ว เอาท์พุทของวงจรนี้จะกลายเป็นอินพุทให้กับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ซึ่งมีค่าคงที่ รหัสเอาท์พุทจะไม่เปลี่ยนแปลงจนกว่าจะมีแซมเปิ้ลพัลส์ใหม่เกิดขึ้น ทำให้แน่ใจได้ว่าปริมาณของอินพุทจะไม่เปลี่ยนขณะที่กำลังทำการแปลงสัญญาณ เพื่อประกันถึงความถูกต้องของรหัสเอาท์พุทที่ได้

2. ใช้ตัวคอมพาราเตอร์ในการพักข้อมูล โดยขอบขาขึ้นของการเริ่มต้นการแปลงข้อมูลอินพุท จะทำการพักข้อมูลของคอมพาราเตอร์ ในเวลานั้นรหัสของอินพุทจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จนกว่าจะมีสัญญาณเริ่มต้นแปลงอินพุทอีกครั้ง รหัสเอาท์พุทจะยังคงที่ในช่วงการรอรับสัญญาณเริ่มต้นการแปลงข้อมูล ยกเว้นช่วงเวลาสั้นๆ ที่ใช้ในการแปลง ซึ่งก็คือช่วงหน่วง (delay) ของการเข้ารหัสนั่นเอง

วิธีนี้จะเหมือนกับวิธีของวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่า ยกเว้นเอาท์พุทของคอมพาราเตอร์จะถูกแซมเปิ้ลและเก็บค่าไว้ได้หลายค่า ไม่เหมือนกับวิธีของวงจรแซมเปิ้ลและเก็บค่า ซึ่งมีเอาท์พุทของคอมพาราเตอร์ได้เพียงค่าเดียว

วงจรนี้ถูกเรียกว่าแฟรชคอนเวอร์เตอร์ เพราะมีความเร็วสูงในการแปลงสัญญาณ ถ้าเราใช้คอมพาราเตอร์และตัวถอดรหัส (decoder) อย่างเร็วอีก เอาท์พุทจะได้ทันทีที่อินพุทเปลี่ยนไป แน่นอนเราต้องมีการเก็บค่าไว้ใช้จึงควรใช้ระบบการเก็บค่าที่มีความเร็วมากๆ เพื่อเก็บข้อมูลที่ออกมาอย่างรวดเร็ว สังเกตว่าในตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลชนิดนี้ จะไม่มีตัวควบคุมคล็อก (clock control) ซึ่งตัวควบคุมคล็อกใช้ในการติดต่อควบคุมระหว่างเอาท์พุทของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล และวงจรเก็บค่า ข้อเสียเปรียบของวงจรแบบนี้ก็คือ ต้องใช้จำนวนของคอมพาราเตอร์มากมายถ้าเราต้องการเรสโซลูชั่นสูงๆ ซึ่งจำนวนของคอมพาราเตอร์หาได้จากสมการ 2-33 โดยN คือจำนวนของคอมพาราเตอร์ และn คือจำนวนบิตเอาท์พุท

$$N = 2^{N}-1 \qquad (2\text{-}3)$$

ในโครงงานนี้เราได้ใช้ ตัวแปลงสัญญาณแบบขนานเบอร์ CA3306 ขนาด 6 บิต ตารางที่ 1 เป็นตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของตระกูลปแฮร์ริส (Harris) โดยในตระกูลนี้มีตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลแบบขนาน อยู่หลายเบอร์ที่สามารถใช้งานได้แตกต่างกันไปตามความต้องการ โดยในการใช้งานเราจะต้องใช้ระดับลอจิกของเอาท์พุท และความเร็วคล็อกที่เหมาะสมเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนให้น้อยที่สุด โดยการใช้ตระกูลลอจิกที่ช้าที่สุดเท่าที่จะทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายชื่อ	จำนวนบิต	ความเร็วในการแปลงข้อมูล	ระดับลอจิก	ช่วงกว้างของอินพุท	เทคโนโลยี
CA3304	4	25MSPS	CMOS	13 MHz	CMOS flash
CA3306	6	18MSPS	CMOS	9 MHz	CMOS flash
HI5701	6	30MSPS	CMOS/TTL	20 MHz	CMOS flash
CA3318	8	15MSPS	CMOS	2.5 MHz	CMOS flash
HI5700	8	20MSPS	CMOS/TTL	18 MHz	CMOS flash

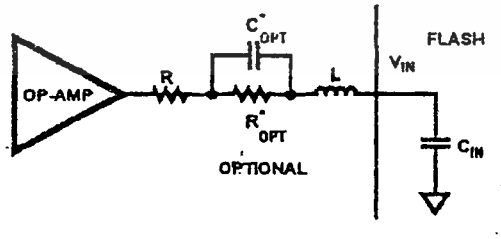
ตารางที่ 1 แสดงตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลชนิดต่างๆ

ตัวอ้างอิงในวงจร (Reference)

ในการออกแบบตัวอ้างอิงสำหรับตัวแปลงสัญญาณที่ถูกต้องนั้น ต้องดูที่ช่วงกว้างของอุณหภูมิของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล และการเกิดสัญญาณรบกวน สำหรับตัวแปลงสัญญาณแบบแฟรชนั้นแรงดันอ้างอิงมีไว้เพื่อเกิดกระแสทรานเซียนท์ระหว่างการแปลงสัญญาณ ดังนั้นการขับขาอ้างอิงของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ระหว่างขา V_{REF+} และ V_{REF-} จึงสำคัญมาก

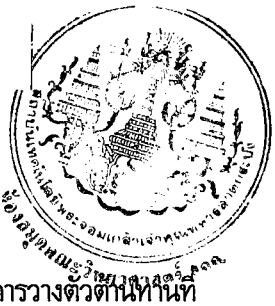
สำหรับในตัว CA3306 ที่เราใช้ในโครงงานนี้มีค่าซีเนอร์ (zener) ภายใน 6.2V ซึ่งสามารถใช้เป็นแรงดันอ้างอิงได้ อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ใช้สำหรับตัวแปลงสัญญาณที่มีเรสโซลูชั่นมากกว่า 6 บิต เพราะซีเนอร์ไดโอดอาจจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นได้

ส่วนวิธีอื่นๆ ในการพิจารณาการเลือกตัวขยาย (amplifier) เพื่อขับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลนั้น วิธีแรกคือไฟกระแสตรงของตัวขยายจะต้องเข้ากันกับระบบได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.3-8 เป็นวงจรอนาลอกอินพุทของตัวแปลงสัญญาณแบบแฟรช ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรรูปที่ 2.3-8 สามารถใช้สำหรับตัวแปลงสัญญาณแบบแฟรช โดยสามารถดูการวางตัวต้านทานที่เหมาะสม ถ้าค่าของตัวต้านทานต่ำเกินไปจะทำให้จุดสูงสุดของการตอบสนองความถี่สูงเกินไป และจะทำให้เกิดการสูญเสียช่วงกว้างของความถี่ (bandwidth) โดยวงจรนี้สามารถใช้กับซีมอส (CMOS) ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลได้เป็นอย่างดี โดยเลือกค่าตัวต้านทานที่เหมาะสม จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$R = 2 \times \sqrt{\left(\frac{L}{C}\right)} \qquad (2\text{-}4)$$

เพราะว่าค่าของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ (L) มีค่ามากๆ ได้ยาก ทำให้เวลาคำนวณจึงต้องใช้การปรับเปลี่ยนค่าโอห์มเพียงเล็กน้อย

การเพิ่มความถูกต้อง

เทคนิคสำหรับซีมอสในการปรับค่าต่างๆ ของตัวแปลงสัญญาณนั้น ค่าออฟเซ็ต,ส่วนขยาย และความเป็นเส้นตรง ที่ถูกต้องนั้นสำคัญมาก

ควรพยายามทำให้เกิดค่าขนาดของออฟเซ็ตน้อยที่สุด โดยการใช้แรงดันอ้างอิงน้อยสุด (V_{REF-}) ค่าออฟเซ็ตนั้น ควรจะต้องจัดให้เป็นระเบียบเรียบร้อยก่อน แล้วจึงทำการขับตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 0 ถึง 1 ได้อย่างราบเรียบ

ส่วนขยายนั้น ที่ถูกต้องก็ควรจัดให้มีความเป็นระเบียบก่อนเหมือนกัน โดยสามารถทำในวงจรก่อนก็ได้ แต่ทางที่ดีควรปรับค่าของแรงดันอ้างอิงให้เต็มสเกล (V_{REF+})

ค่าความผิดพลาดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (linearity) ในตัวแปลงสัญญาณแบบแฟรชหลายๆ ครั้งนั้น เนื่องมาจากว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นเส้นโค้งมากกว่าที่เป็นเส้นตรง สามารถแก้ไขได้โดยการนำตัวต้านทานปรับค่าได้มาทำการปรับ ซึ่งค่านี้ควรทำหลังจากที่ปรับค่าของออฟเซ็ต และส่วนขยายให้เป็นระเบียบเรียบร้อยแล้ว

2.4 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit Design)

การออกแบบวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณนั้นโดยทั่วไปจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไอซีออพเพอเรชั่นแนลแอมพลิฟายร์ หรือที่มักเรียกสั้นๆว่า " ออปแอมป์ " (op-amp) คือวงจรรวม (integrated circuit)โซลิด-สเตท แบบหนึ่งที่ใช้การป้อนกลับภายนอกควบคุมฟังก์ชั่นหรือการทำงานของมัน ออปแอมป์สามารถนำไปใช้ในวงจรต่างๆ ได้มากมายหลายอย่างด้วยกัน เป็นต้นว่า วงจรขยาย วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรดิฟเฟอเรนทิเอเตอร์ วงจรโวลเตจ-ฟอลโลเวอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญมากของมันก็คือมันมีหลักการทำงานง่ายๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

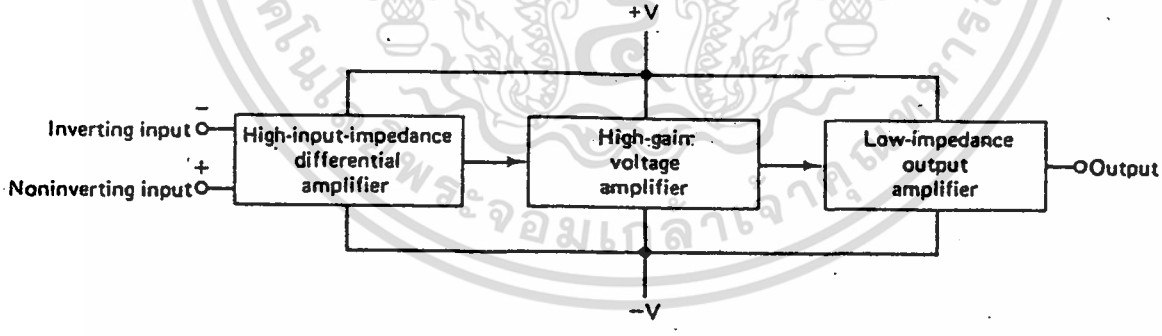
ออปแอมป์แต่ละตัวต่างมีคุณสมบัติซึ่งสามารถทราบได้จากสเป็ค (spec) ของโรงงานผู้ผลิตออปแอมป์นั้นๆ เช่น บางตัวมีอัตราขยายแรงดันและกระแสสูง ย่านความถี่กว้าง มีการป้องกันการลัดวงจร การชดเชยความถี่ภายในกินกำลังต่ำ การป้องกันการ "ลัด" วงจรภายในและเสถียรภาพทางอุณหภูมิ (stability) ดี เป็นต้น

2.4.1 คุณสมบัติทั่วไปของออปแอมป์

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถกล่าวได้ว่า ไอซีออปแอมป์ คือ อุปกรณ์โซลิดเสตท (solid state) ชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถตรวจวัดระดับสัญญาณไฟตรง และไฟสลับได้ และยังสามารถนำไปใช้ขยายสัญญาณได้อีกด้วย ไอซีออปแอมป์พื้นฐานจะต้องประกอบด้วยวงจรภายในภาคต่างๆ ดังนี้ คือ

1. ดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์ หรือ วงจรขยายผลต่าง (differential amplifier) ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก
2. วงจรขยายแรงดันซึ่งมีอัตราขยายสูงมาก
3. วงจรขยายภาคเอาท์พุทที่มี เอาท์พุทอิมพิแดนซ์ต่ำมาก

รูป 2.4-1 แสดงบล็อคไดอะแกรมของวงจรภายในภาคต่างๆ ของออปแอมป์ดังกล่าว และจากรูปจะสังเกตได้ว่า แรงดันไฟตรงที่จ่ายให้แก่ออปแอมป์มักประกอบด้วยไฟบวกและลบ เพื่อให้เอาท์พุทสามารถสวิงได้ทั้งซีกบวกและลบเทียบกับกราวด์



รูปที่ 2.4-1 บล็อคไดอะแกรมของวงจรภายในออปแอมป์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่กล่าวมา ทำให้สามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญบางประการของออปแอมป์ในอุดมคติ ดังนี้

1. เนื่องจากอินพุทอิมพิแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าสูงเป็นอนันต์ กระแสเข้าที่อินพุทจะต่ำจนเกือบเท่าศูนย์ หรืออีกนัยหนึ่งคือไม่มีกระแสอินพุทเข้าสู่ออปแอมป์เลย

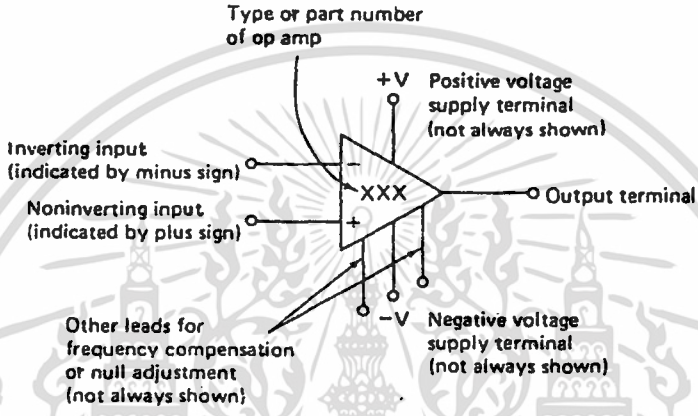
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2. อัตราขยายขณะเปิดลูป A (ขณะที่ยังไม่มีการป้อนกลับ) จะมีค่าสูงมาก ซึ่งหมายความว่า แรงดันระหว่างขั้วอินพุทควรมีค่าใกล้ศูนย์ (เนื่องจาก Vout/A = Vin)

3. เอาท์พุทอิมพิแดนซ์มีค่าต่ำมากจนไม่ทำตัวเป็นโหลดต่อภาคเอาท์พุทของวงจรขยาย

รูป 2.4-2 แสดงสัญญลักษณ์ทั่วไปของออปแอมป์ ซึ่งประกอบด้วยขั้วอินพุท 2 ขั้ว ขั้วสำหรับแหล่งจ่ายไฟ 2 ขั้ว ขั้วเอาท์พุท 1 ขั้ว และขั้วสำหรับปรับออฟเซ็ท หรือการชดเชยความถี่ อีก 2 ขั้ว



รูปที่2.4-2 แสดงสัญญลักษณ์ทั่วไปของออปแอมป์

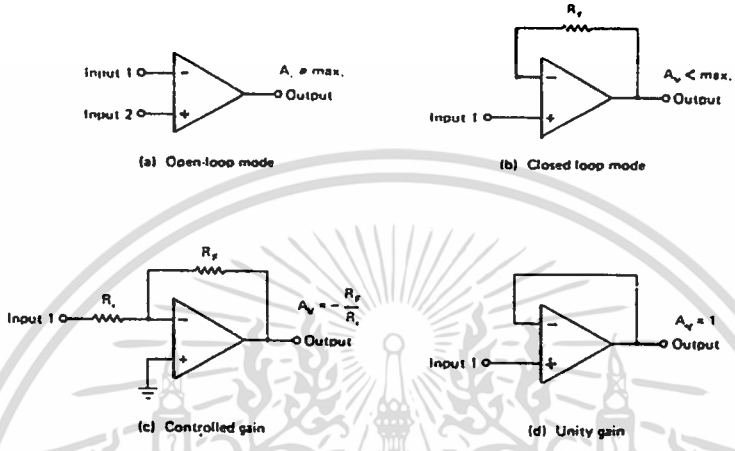
ขั้วอินพุททั้งสองของออปแอมป์มีลักษณะต่างกันดังนี้ คือสำหรับขั้วลบ เมื่อป้อนไฟตรงหรือไฟสลับเข้าไป ในขณะที่ขั้วบวกต่อกับจุดอ้างอิงจุดหนึ่ง สัญญาณที่ออกมาที่เอาท์พุทจะกลับเฟสกับอินพุท 180 องศา ส่วนการป้อนสัญญาณที่ขั้วบวก เอาท์พุทจะมีเฟสตรงกับอินพุท ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเครื่องหมายที่อินพุท คือการแสดงเฟสของเอาท์พุทเทียบกับอินพุท ส่วนขั้วสำหรับปรับออฟเซ็ท หรือชดเชยความถี่นั้นโดยมากมักจะไม่ถูกแสดงในวงจรทั่วไป

2.4.2 ลักษณะการทำงานของออปแอมป์

ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีอัตราขยายเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติ อัตราขยายอาจมีค่าสูงสุดเพียง 10000 หรือ 1000000 เท่านั้น ซึ่งเรียกว่า อัตราขยายขณะเปิดลูป (Av) ดังรูป 2.4-3(a) ในขณะที่เกิดความแตกต่างของแรงดันเพียงเล็กน้อยระหว่างขั้วอินพุททั้งสอง เอาท์พุทจะสามารถให้สัญญาณสูงขึ้นหลายเท่า (ตามค่าของอัตราขยาย Av) หากแต่จะถูกจำกัดด้วยขนาดของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงที่เราป้อนให้แก่ออปแอมป์ด้วย แต่ถึงเช่นนั้นก็ดี เอาท์พุทก็จะไม่สามารถมีค่าสูงสุดเท่ากับแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงได้จริง ทำให้แรงดันเอาท์พุทสูงสุดอาจมีค่าประมาณ 90เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติข้างต้น เราสามารถนำออปแอมป์ในขณะเปิดลูปไปใช้งานเป็นคอมพาราเตอร์ (comparator) หรือวงจรเปรียบเทียบแรงดันได้ โดยเอาท์พุทจะเปลี่ยนทันทีเมื่อมีแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอินพุทของออปแอมป์แตกต่างกัน



รูปที่ 2.4-3 ลักษณะการทำงานของออปแอมป์แบบต่างๆ

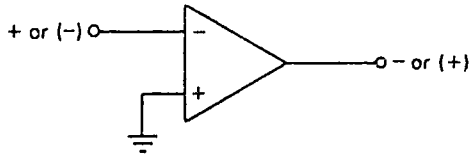
แต่ทว่าการทำงานของออปแอมป์ยังไม่สิ้นสุดเพียงเท่านั้น นอกจากนี้ จะพบว่าการใช้งานออปแอมป์ในลักษณะของลูปปิด (มีการป้อนกลับ) จะทำให้ออปแอมป์มีประโยชน์สูงมากขึ้น ดังรูป 2.4-3(b) การป้อนกลับในรูปใช้ตัวต้าน R_F เพียงตัวเดียว ซึ่งมีผลให้ทำห้วงจรมีเสถียรภาพสูงขึ้น และมีสัญญาณรบกวนน้อยลง ในขณะเดียวกัน อัตราขยายแรงดันจะลดลงด้วย

วงจรในรูป 2.4-3(c) แสดงการใช้ออปแอมป์โดยมีการป้อนสัญญาณเอาท์พุทกลับมายังอินพุท นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมอัตราการขยายแรงดัน (ในขณะปิดลูป) ได้โดยอาศัยตัวต้านทาน 2 ตัวเท่านั้นทำให้อัตราการขยายแรงดัน Av มีค่าดังสมการ

$$A_V = -\frac{R_f}{R_i} \qquad (2\text{-}5)$$

โดยที่เครื่องหมายลบแสดงถึงการกลับเฟสของเอาท์พุทเทียบกับอินพุท ส่วนวงจร 2.4-3(d) แสดงการป้อนกลับในกรณีที่ Av = 1 คุณสมบัติที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ คือคุณสมบัติทั่วไปของออปแอมป์ที่จะนำไปใช้ต่อไป และนอกจากนี้ คุณสมบัติอีกประการที่ควรศึกษาคือเรื่องความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ระหว่างอินพุทของออปแอมป์ ซึ่งสรุปไว้แล้วในรูป 2.4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4-4 ความสัมพันธ์ของขั้วต่างๆ ในออปแอมป์

1. ถ้าขั้ว - มีศักดาเป็นบวกสูงกว่าขั้ว + , เอาท์พุทเป็น -
2. ถ้าขั้ว - มีศักดาเป็นบวกต่ำกว่าขั้ว + , เอาท์พุทเป็น +

2.4.3 คุณสมบัติและพารามิเตอร์บางชนิดของออปแอมป์

1. อินพุทอิมพิแดนซ์

ในทางอุดมคติควรมีค่าเท่ากับอนันต์ แต่ในความจริง อินพุทอิมพิแดนซ์จะมีค่าประมาณ 1 เมกกะโอห์ม (1 X 10^{6} โอห์ม) ค่าอินพุทอิมพิแดนซ์นี้ยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าใด ออปแอมป์ตัวนั้นก็จะทำงานได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำออปแอมป์ไปใช้งานในย่านความถี่สูง ควรระวังผลจากอินพุทคาปาซีแตนซ์ของวงจรด้วย ซึ่งมักมีค่าประมาณ 2 พิโคฟารัด (2 X 10^{-12} ฟารัด) เมื่อขั้วอินพุทขั้วหนึ่งต่อกับกราวด์

2. เอาท์พุทอิมพิแดนซ์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีเอาท์พุทอิมพิแดนซ์เป็นศูนย์ แต่ในความเป็นจริงค่านี้อาจมีได้ตั้งแต่ 25 ถึงหลายพันโอห์มขึ้นไป อย่างไรก็ตาม เรามักสมมติให้เอาท์พุทอิมพิแดนซ์ในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อง่ายต่อการคำนวณ และวิเคราะห์

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่มีอินพุทอิมพิแดนซ์สูง และมีเอาท์พุทอิมพิแดนซ์ต่ำออปแอมป์จึงเปรียบเสมือนเป็นอุปกรณ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอิมพิแดนซ์แมทชิ่ง (impedance matching) ที่ดีตัวหนึ่ง

3. กระแสไบอัสด้านอินพุท

เนื่องจากอินพุทอิมพิแดนซ์ของออปแอมป์ไม่เป็นอนันต์ ดังนั้น จึงมีกระแสค่าน้อยๆ (มีหน่วยเป็น นาโน ,10^{-9} ถึง ไมโคร ,10^{-6} แอมแปร์) ไหลผ่านขั้วอินพุททั้งสอง ซึ่งค่าเฉลี่ยของกระแสดังกล่าวถูกเรียกว่าเป็นกระแสไบอัสด้านอินพุท กระแสจะก่อให้เกิดความไม่สมดุลในวงจรภายใน ซึ่งจะเป็นผลกระทบต่อภาคเอาท์พุทด้วย ดังนั้นกระแสนี้ควรถูกกำจัดให้มีค่าต่ำสุด (อาจทำได้โดยการใช้ออปแอมป์ที่มีอินพุทเป็นเฟท, FET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แรงดันออฟเซ็ท (OFFSET) ที่เอาท์พุท

แรงดันออฟเซ็ทที่เอาท์พุทเกิดขึ้นจากกระแสไบอัสด้านอินพุท ซึ่งในทางอุดมคติ เมื่อแรงดันอินพุทระหว่างขั้วทั้งสองมีค่าเท่ากัน แรงดันที่เอาท์พุทควรเป็นศูนย์ แต่โดยทั่วไปมักไม่เป็นเช่นนั้น คือมักมีแรงดันค่าหนึ่งปรากฏที่เอาท์พุทขณะที่อินพุทเป็นศูนย์ ซึ่งเราสามารถแก้ไขได้ โดยการป้อนแรงดัน หรือ กระแสออฟเซ็ทที่อินพุท แล้วปรับจนได้ $V_{out} = 0$ โวลท์

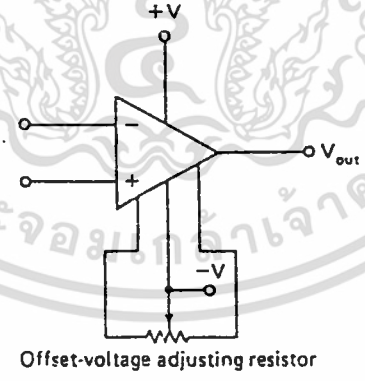
5. กระแสออฟเซ็ทที่อินพุท

ในการปรับแรงดันออฟเซ็ทที่เอาท์พุทให้มีค่าเป็นศูนย์ กระแสอินพุททั้งสองขั้วควรมีค่าเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติ จะพบว่า เราต้องจ่ายกระแสให้แก่อินพุทขั้วหนึ่งมากกว่าอีกขั้วหนึ่งเสมอ เพื่อทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งกระแสออฟเซ็ทนี้อาจมีค่าประมาณ 20 มิลลิแอมป์

6. แรงดันออฟเซ็ทที่อินพุท

ในอุดมคติ แรงดันเอาท์พุทจะเท่ากับศูนย์ก็ต่อเมื่อแรงดันระหว่างขั้วอินพุทมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน แต่ในทางปฏิบัติ ความไม่สมดุลภายในวงจรมักทำให้เราต้องป้อนแรงดันค่าหนึ่งแก่อินพุทใดๆเสมอ เพื่อทำให้แรงดันเอาท์พุทเป็นศูนย์

7. การปรับออฟเซ็ทให้เป็นศูนย์



รูปที่ 2.4-5 วงจรใช้ปรับค่าออฟเซ็ตให้เป็นศูนย์

ในการปรับแรงดันเอาท์พุทให้เป็นศูนย์ หรือการปรับแรงดันออฟเซ็ทที่อินพุทให้เป็นศูนย์นั้น เราอาจใช้ขั้วที่ใช้ปรับออฟเซ็ตให้เป็นศูนย์ (offset nulling) ที่ผู้ผลิตได้เตรียมไว้ให้แล้ว โดยให้ศึกษาข้อมูลรายละเอียดของออปแอมป์เบอร์นั้นๆ รูป2.4-5 แสดงวงจรที่ใช้ในการตั้งค่าศูนย์ให้แก่ออปแอมป์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตรวจสอบวงจรให้เรียบร้อยและเช็คอุปกรณ์ที่ต้องนำมาต่อ
2. ลดระดับสัญญาณอินพุทจนเหลือศูนย์ ถ้ามีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับอินพุทอยู่ให้ตรวจสอบดังนี้

ก) ถ้าตัวต้านทานนั้นมีค่าสูงกว่าอิมพิแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณอินพุท ตั้งแต่ 1 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ให้ปล่อยตัวต้านทานไว้เช่นเดิม

ข) หากตัวต้านทานดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากัน ให้นำแหล่งกำเนิดสัญญาณอินพุทนั้นออกแล้วต่อตัวต้านทานที่มีขนาดเท่ากับอินพุทอิมพิแดนซ์ของแหล่งกำเนิดอินพุทเข้าแทน

ค) ต่อโหลดเข้าไปยังขั้วเอาท์พุท

ง) ป้อนไฟตรงให้วงจร

จ) วัดแรงดันที่เอาท์พุทด้วย โวลท์มิเตอร์ หรือ ออสซิลโลสโคป (แรงดันเอาท์พุทอาจมีค่าต่ำเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ ดังนั้น ควรใช้อุปกรณ์สำหรับวัดที่เหมาะสม)

ฉ) ปรับตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้จน V_{out} มีค่าเป็นศูนย์

ช) ถอดอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้าไป แล้วต่อวงจรดังเดิม แต่ห้ามแตะต้องตัวต้านทานปรับค่าได้

8. ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออุปกรณ์โซลิดสเตททุกชนิด รวมทั้งออปแอมป์ด้วย ดังนั้นผลกระทบจากอุณหภูมิจะทำให้กระแสและแรงดันออฟเซ็ทเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนแปลงอันเกิดขึ้นจากอุณหภูมิว่า "ดริฟท์" ดังนั้นในขณะทำงาน ควรตรวจสอบด้วยว่าออปแอมป์จะมีเปอร์เซนต์การผิดพลาดมากน้อยเพียงใดหากอุณหภูมิเปลี่ยนไป

9. การชดเชยความถี่

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับออปแอมป์ที่ใช้ในย่านความถี่สูงก็คือ การออสซิลเลท (oscillation) ซึ่งเกิดจากอัตราขยายที่มีค่าค่อนข้างสูงของออปแอมป์เอง และยังเกิดจากการเลื่อนเฟส (phase shift) ณ จุดต่างๆ ภายในวงจร เป็นผลให้เราไม่สามารถควบคุมอัตราขยายของสัญญาณป้อนกลับได้ วิธีแก้ปัญหาก็คือ ต่อตัวเก็บประจุชดเชยให้แก่วงจร ซึ่งจะทำให้อัตราการขยายของออปแอมป์มีขนาดลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. อัตราสลูว์ (slew rate)

อัตราสลูว์ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของแรงดันเอาท์พุทเทียบกับเวลา ดังสมการ

$$\text{อัตราสลูว์} = \frac{\Delta V_{out}(\max)}{\Delta t} \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่ออัตราสลูว์มีค่าต่ำ จะเป็นผลให้แรงดันที่เอาท์พุทมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงช้าลง เมื่อเทียบกับอินพุท เมื่อสัญญาณอินพุทมีความถี่สูงมากขึ้นเท่าใด อัตราสลูว์จะมีบทบาทต่อการตอบสนอง ณ เอาท์พุทอย่างเด่นชัดยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเอาท์พุทที่จะเพี้ยนมากขึ้นหากอัตราสลูว์มีค่าน้อย หรืออีกนัยหนึ่ง ออปแอมป์ที่มีอัตราสลูว์สูงจะมีแบนด์วิดธ์กว้างกว่านั่นเอง

11. การตอบสนองความถี่

อัตราขยายของออปแอมป์จะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ซึ่งจะพบว่าอัตราขยายที่ผู้ผลิตแสดงไว้ในดาต้าชีท (data sheet) จะเป็นอัตราขยายที่ความถี่ 0 เฮิรทซ์ หรือ ไฟตรง (ซึ่งแสดงให้เห็นความถี่สูงสุดของออปแอมป์) ในการทำงานแบบลูปเปิด จะเห็นได้ว่าวงจรมีเสถียรภาพต่ำมาก นั่นคือเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นสิบเท่า อัตราขยายจะลดลง 10 เท่าทันที

โดยทั่วไปแล้ว แบนด์วิดธ์ของวงจรจะหมายถึงช่วงความถี่อัตราขยายมีค่า 70.7 เปอร์เซ็นต์ ของอัตราขยายสูงสุด จากตัวอย่างในรูปแบนด์วิดธ์ของออปแอมป์ขณะเปิดลูป จะมีค่าประมาณ 10 เฮิรทซ์ ดังนั้น หากต้องการให้วงจรที่ออกแบบขึ้นสามารถทำงานได้ที่ความถี่อินพุทสูงๆ จะต้องป้อนสัญญาณจากเอาท์พุท กลับมายังอินพุท (การป้อนกลับแบบลบ) ซึ่งจะทำให้อัตราขยายของลูปปิดลดลง แต่ในขณะเดียวกัน ความถี่ที่อัตราขยายเท่ากับ 70.7เปอร์เซ็นต์ ของอัตราขยายสูงสุดก็จะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเท่ากัน ส่วนจุดที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง (unity-gain point) จะแสดงความถี่สูงสุดของออปแอมป์เมื่ออัตราขยายมีค่าเป็นหนึ่ง

12. ผลคูณของอัตราขยายและแบนด์วิดธ์

จากที่ได้อธิบายมาในหัวข้อที่แล้วว่า เมื่ออัตราขยายลดลงเท่าใด ความถี่ก็จะสูงขึ้นเป็นจำนวนเท่าของค่านั้นด้วย ซึ่งแสดงว่า ผลคูณระหว่างอัตราขยายและแบนด์วิดธ์จะมีค่าคงที่เสมอไป และเราสามารถหาค่านั้นได้จากจุดซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง (ค่านี้จะหาได้จากดาต้าชีท) ผลคูณนี้มีประโยชน์อย่างมากในการประมาณความถี่สูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้

13. อัตราการลดสัญญาณชนิดคอมมอนโหมด (CMRR)

อัตราการลดสัญญาณชนิดคอมมอนโหมด (CMRR) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของออปแอมป์ที่ได้มาจากภาคอินพุทที่เป็นดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์ หมายความว่า หากสัญญาณที่เข้ามายังขั้วอินพุททั้งสองมีเฟสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน และยังมีขนาดเท่ากัน (สัญญาณแบบนี้เรียกว่าอยู่ในคอมมอนโหมด) สัญญาณทั้งสองนี้จะถูกกำจัดทิ้งไป ดังนั้นเอาท์พุทจะเป็นศูนย์ ส่วนสัญญาณที่มีขนาดต่างกันและมีเฟสต่างกันจะเรียกว่าอยู่ในดิฟเฟอเรนเชียลโหมด

14. หน่วยเดซิเบล (dB)

การคำนวณอัตราขยายของวงจรใดๆ สามารถหาได้จากสมการ

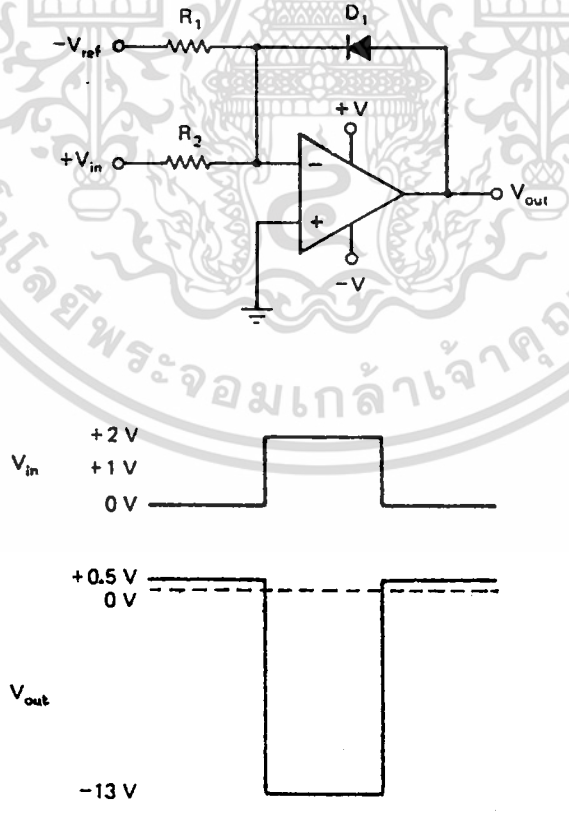
$$A_x = \frac{X_{out}}{X_{in}} \qquad (2\text{-}7)$$

โดยที่ x อาจเป็นแรงดัน หรือ กระแสก็ได้ และโดยทั่วไปนิยมอัตราขยายจากสมการ

$$dB = 20 \log A_v \qquad (2\text{-}8)$$

2.4.4 การออกแบบวงจรคอมพาราเตอร์ (วงจรเปรียบเทียบ)

วงจรคอมพาราเตอร์เป็นวงจรที่มีประโยชน์มากโดยเฉพาะการใช้แรงดันอินพุทขนาดต่ำไปควบคุมแรงดันเอาท์พุทที่มีค่าสูง โดยแรงดันอินพุทที่ใช้อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้โดยเอาท์พุทจะถูกตรึงไว้ที่แรงดันระดับหนึ่ง ซึ่งต่างกับคอมพาราเตอร์ที่เราได้ศึกษามาแล้ว



รูปที่ 2.4-6 แสดงวงจรที่ใช้ออปแอมป์เป็นคอมพาราเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

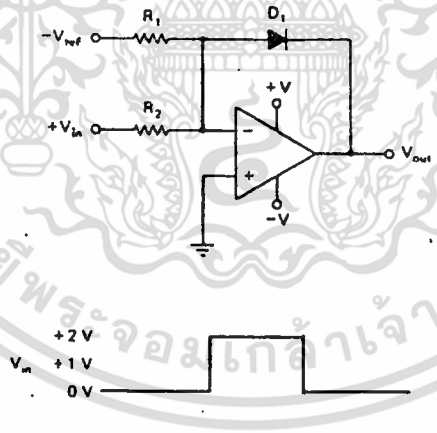
รูปที่ 2.4-6 แสดงวงจรที่ใช้ออปแอมป์เป็นคอมพาราเตอร์ และใช้ไดโอดสำหรับควบคุมลักษณะการทำงานของออปแอมป์ว่าจะเป็นชนิดเปิดลูปหรือชนิดปิดลูป โดยการแบ่งแรงดันระหว่าง V_{ref} และ V_{in} คร่อมตัวต้านทาน R_1 และ R_2 เมื่อแรงดัน V_{in} มีค่าต่ำ (0 โวลต์) ศักดาที่ขั้วเพิ่มค่าแรงดัน V_{in} ให้สูงขึ้น (เป็น +2 โวลท์ ดังในรูป) ไดโอด D_1 จะถูกไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นออปแอมป์จึงทำหน้าที่เป็นคอมพาราเตอร์ทั่วไป ซึ่งทำให้เอาท์พุทมีขนาดเท่ากับ $-V_{sat}$

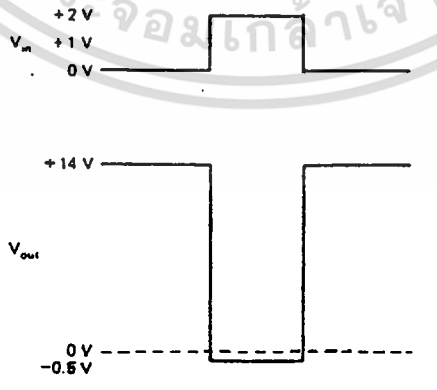
ขั้นตอนการออกแบบวงจรคอมพาราเตอร์

1. เลือก R_1 (ประมาณ 100 กิโลโอห์ม)
2. เลือกค่า V_{in} ที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนสถานะที่เอาท์พุท
3. คำนวณ R_2 จากสมการ

$$R_2 = \frac{R_1 V_{in}}{V_{ref}} \qquad (2\text{-}9)$$

เมื่อไดโอดในรูปที่ 2.4-6 ถูกสลับขั้วดังรูป 2.4-7 เอาท์พุทที่ได้จะมีลักษณะกลับกัน แต่ก็ยังคงใช้สมการชุดเดียวกันสำหรับการคำนวณ



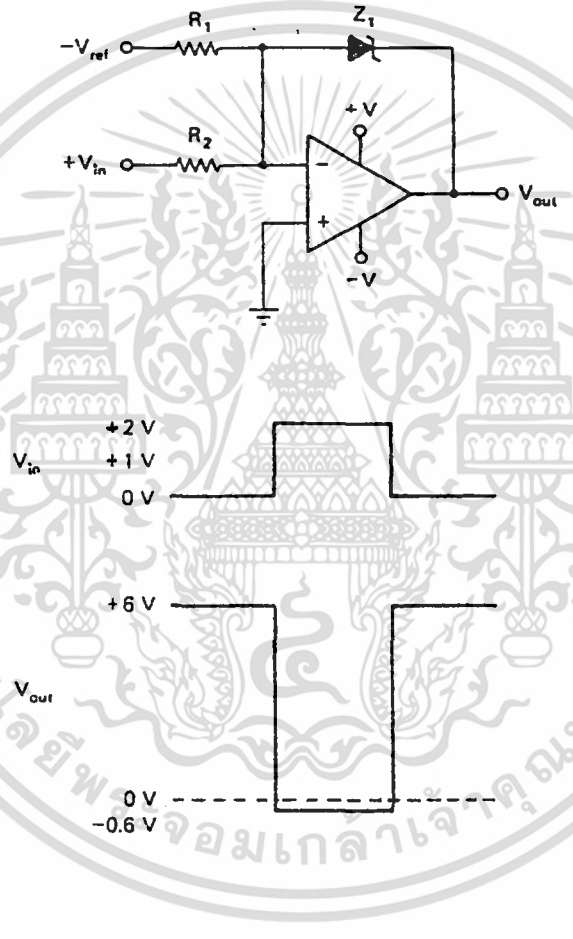


รูปที่ 2.4-7 เอาท์พุทที่ได้หลังจากที่สลับขั้วไดโอดจากรูปที่ 2.4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการใช้แรงดัน V_{in} ที่เป็นค่าบวกแล้ว ยังสามารถใช้ V_{in} ที่เป็นลบได้และวงจรทั้งสองต่างก็มีขั้นตอนในการออกแบบเหมือนกับที่ได้กล่าวมาแล้วทุกประการ

ส่วนวงจรในรูป 2.4-8 เป็นการใช้ซีเนอร์ไดโอดสำหรับตรึงแรงดันเอาท์พุทไม่ให้สูงเท่า V_{sat} แต่จะมีระดับสูงสุดเท่ากับแรงดันพังทลายของซีเนอร์ไดโอด (เท่ากับ 6 โวลท์ในรูป) และถ้ากลับขั้วของไดโอดแรงดันที่ถูกตรึงไว้ก็จะมีค่าเป็นลบ



รูปที่ 2.4-8 การใช้ซีเนอร์ไดโอดในวงจรคอมพาราเตอร์

2.4.5 วงจรขยายไม่กลับเฟส

ขั้นตอนการออกแบบวงจรขยายไม่กลับเฟสสำหรับไฟตรง

1. หาค่า R_S
2. เลือก R_{IN} เท่ากับ R_S
3. เลือก V_{IN}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณค่าของอัตราขยายที่ต้องการจากสมการ

$$A_V = V_{OUT}/V_{IN} \quad (2\text{-}10)$$

5. คำนวณค่า R_F จากสมการ

$$R_F = A_V R_{IN} - R_{IN} \quad (2\text{-}11)$$

6. หาค่า R_L หรือใช้ R_L = 2.2 กิโลโอห์ม

7. คำนวณ V_{OUT} จาก

$$V_{OUT} = (1+R_F/R_{IN})V_{IN} \quad (2\text{-}12)$$

8. คำนวณ I_{IN} จาก

$$I_{IN} = V_{IN} /(RS+Z_{IN}) \quad (2\text{-}13)$$

(Z_{IN} มีค่าประมาณ 1 เมกกะโอห์ม)

9. คำนวณค่า I_{OUT} จาก

$$I_{OUT} = V_{OUT} /R_L \quad (2\text{-}14)$$

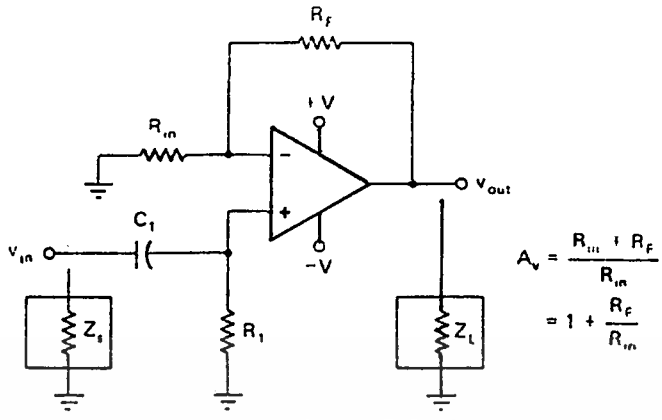
10. คำนวณ A_I จาก

$$A_I = I_{OUT} /I_{IN} \quad (2\text{-}15)$$

ส่วนการออกแบบวงจรขยายไม่กลับเฟสสำหรับกระแสไฟสลับดังรูป 2.4-9 ก็จะมีขั้นตอนเช่นเดียวกัน เพียงแต่เพิ่มตัวเก็บประจุ C_1 ขึ้นมาเท่านั้น และหา C_1 ได้สมการ

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(Z_s + R_1)F_C} \quad (2\text{-}16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4-9 การออกแบบวงจรขยายไม่กลับเฟสสำหรับไฟกระแสสลับ

ส่วนการต่อวงจรขยายไม่กลับเฟสร่วมกันโดยใช้ออปแอมป์มากกว่าหนึ่งตัวดังรูป 2.4-10 มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกค่า V_{IN}
2. เลือก R_3 ค่าประมาณ 5 ถึง 50 กิโลโอห์ม และ $R_1 = R_3$
3. คำนวณ C_1 จากสมการ

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(Z_s + R_3)F_C} \qquad (2\text{-}17)$$

4. เลือกค่า A_{V1} ที่ต้องการ
5. คำนวณ R_2 จากสมการ $R_2 = A_{V1}R_1 - R_1$
6. ใช้ R_4 ที่มีค่าเท่า R_1
7. เลือกค่า A_{V2}
8. คำนวณ R_5 จากสมการ $R_5 = A_{V2}R_4 - R_4$
9. หาค่า Z_L ของวงจรถัดไป หรือใช้ Z_L = 2.2 กิโลโอห์ม
10. คำนวณ A_{VT} จาก A_{V1} X A_{V2}
11. คำนวณ V_{OUT} จากสมการ $V_{OUT} = A_{VT}V_{IN}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวางอุปกรณ์ในวงจรดิจิตอลและการเกิดสัญญาณรบกวน

การออกแบบวงจรดิจิตอล ที่ไม่คำนึงถึงระบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากตัวอุปกรณ์ จะทำให้เครื่องมือที่ออกแบบมีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง ดังนั้นในระบบดิจิตอลที่ดีจะต้องพิจารณาระบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากตัวอุปกรณ์ด้วย ถึงแม้ว่าส่วนสำคัญในการออกแบบวงจรดิจิตอลนั้น คือการใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณสถานะลอจิกให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่วงจรที่นำมาใช้งานอาจจะไม่ทำงาน หรือทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร ถ้าไม่ได้คำนึงถึงปัญหาของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาจากตัวอุปกรณ์ การควบคุมสัญญาณรบกวน และแก้ไขปัญหาการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะต้องทำการพิจารณา ตั้งแต่ก่อนการออกแบบ, ขณะทำการวางอุปกรณ์ และในการทดสอบการทำงานของวงจรแต่ละส่วน

ระบบดิจิตอลนั้นเราสามารถมองได้ในอีกรูปหนึ่ง คือเป็นระบบคลื่นวิทยุที่มีสัญญาณรบกวนและการแทรกสอดของศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบวงจรที่ถูกต้องแล้ว จะต้องใช้ความรู้ในการออกแบบระบบดิจิตอล และต้องคำนึงถึงการออกแบบ และวิเคราะห์ระบบของคลื่นวิทยุด้วย นอกจากนี้วงจรดิจิตอลยังมีเทคนิคในการออกแบบวงจรที่ต่างไปจากวงจรอนาลอก ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบระบบการต่อกราวด์ ระบบไฟเลี้ยง และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่นในวงจรอนาลอกที่ใช้การออกแบบระบบกราวด์ ด้วยการรวมกราวด์ให้เป็นจุดเดียวกัน แต่ในระบบดิจิตอลนั้นการออกแบบระบบกราวด์ ลักษณะเช่นนี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดสัญญาณรบกวน และเกิดการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย

เมื่อเราพิจารณาวงจรรวม (Integrated circuit,IC) ดิจิตอล ในขณะทำงานจะมีการดึงกระแสจากไฟเลี้ยงไม่กี่มิลลิแอมป์ ซึ่งถ้ามองโดยผิวเผินแล้ว ไม่น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจนเป็นปัญหารบกวนการทำงานของระบบได้ แต่เนื่องจากวงจรรวมดิจิตอล ทำงานแบบสวิทชิ่ง (switching) ด้วยความเร็วสูง ประกอบกับมีการเหนี่ยวนำของตัวนำในวงจรรวม จึงทำให้วงจรรวมเหล่านี้ เป็นแหล่งกำเนิด สัญญาณรบกวนได้ เราสามารถพิจารณาความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีกระแสไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ได้จากความสัมพันธ์

$$V = L\frac{di}{dt} \qquad (2\text{-}18)$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำ และ di/dt คืออัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส ตัวอย่างเช่นลอจิกเกท (logic gate) มีการดึงกระแสจากไฟเลี้ยงในสภาวะ"เปิด" 5 มิลลิแอมแปร์ และในสภาวะ"ปิด" 1 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งในขณะนั้นจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเป็น 4 มิลลิแอมแปร์ ภายในเวลา 2 ns สมมุตว่า ถ้าสายไฟเลี้ยงมีค่าความเหนี่ยวนำ 500 nH แล้วความต่างศักย์ของสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องมาจากสายของไฟเลี้ยงเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะนี้ คำนวณได้จากสมการที่ (2-18) ได้เท่ากับ 1 V และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณเมื่อมีเกทในระบบเพิ่มมากขึ้น โดยปกติแล้วไฟเลี้ยงที่ใช้ในระบบดิจิตอลนั้น จะมีค่าเป็น 5V เมื่อเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะเห็นว่ามีขนาดใหญ่มาก และสัญญาณรบกวนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดได้จากทั้งระบบกราวด์, ระบบไฟเลี้ยง และจากสายนำสัญญาณในระบบ

ในการสร้างเครื่องมือจึงจะต้องมีการออกแบบให้มีสัญญาณรบกวนในระบบน้อยที่สุด ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องมาจากภายในตัวอุปกรณ์, จากการแพร่ของคลื่นวิทยุ และจากการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ทางดิจิตอล ซึ่งในวงจรดิจิตอลนั้นการลดสัญญาณรบกวนอย่างหนึ่งในระบบก็จะมีส่วนลดสัญญาณรบกวน เนื่องจากสาเหตุอื่นตามไปด้วย

การออกแบบวงจรดิจิตอลนั้น สภาวะการทำงานของเกทต่าง ๆ จะมองในรูปของไทม์โดเมน (time domain) แต่ถ้าในการพิจารณาสัญญาณรบกวนภายในระบบแล้ว การมองในรูปความถี่โดเมน (frequency domain) จะทำให้ง่ายต่อการพิจารณา เพราะว่าการพิจารณาการแพร่ของคลื่นวิทยุ ก็อยู่ในรูปของความถี่ และการพิจารณาในส่วนควบคุมการแทรกสอดไม่ว่าจะเป็นการกรองสัญญาณและการกันสัญญาณรบกวนนั้นก็พิจารณาในรูปของความถี่ทั้งสิ้น

ฮาร์โมนิก (harmonic) ที่ประกอบกันขึ้นเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) นั้นกว้างถึงอินฟินิตี้ (infinity) แต่อย่างไรก็ตามเรามีจุดที่จะตัดสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าจุดนั้นทิ้งได้ด้วยการพิจารณากำลังของฮาร์โมนิก โดยจุดที่ยุติการนำเข้ามารวมพิจารณา คือจุดที่มีสัมประสิทธิ์ของฟูรีเยร์ (Fourier) ลดลงต่ำกว่า 40 dB/decade และความกว้างของความถี่ในระบบดิจิตอล จะมีความสัมพันธ์กับเวลาขอบขาขึ้นของพัลส์ (t_r) ตามความสัมพันธ์ ของสมการ

$$BW = \frac{1}{\pi t_r} \qquad (2\text{-}19)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าเวลาของสัญญาณขอบขาขึ้นมีค่าเท่ากับ 2ns. จะมีความกว้างของความถี่ (bandwidth) เท่ากับ 159 เมกกะเฮิรทซ์ โดยตารางที่ (2) จะแสดงเวลาในขอบขาขึ้นและลง เทียบกับความกว้างของความถี่ ($1/\pi t_r$) ในลอจิกดิจิตอล แต่ละตระกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตระกูล	เวลาในขอบขาขึ้นและลง (ns)	ช่วงกว้างของความถี่ (MHz)
CMOS	50	6.3
TTL	10	32
HCMOS	9	32
LSTTL	5	64
ALS	4	80
ACL	3	106
FAST	3	106
AS	2	159
ECL(10K)	2	159
ECL(100K)	1	318

ตารางที่ (2) แสดงเวลาเทียบกับแบนวิดธ์ในลอจิกดิจิตอลตระกูลต่างๆ

สำหรับวงจรอนาลอกนั้น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาแทรกสอดในวงจรจะเป็นสัญญาณรบกวนจากภายนอกวงจร ซึ่งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะมีระดับสัญญาณที่ต่ำมาก ในระดับมิลลิโวลต์ หรือไมโครโวลต์ แต่สัญญาณรบกวนเหล่านี้จะรวมเข้ากับสัญญาณ โดยจะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราการขยายสูง ทำให้มีขนาดสูงขึ้นได้ ในทางกลับกัน วงจรดิจิตอลไม่มีส่วนขยายสัญญาณและทำงานในระดับสัญญาณที่สูงกว่าวงจรอนาลอก แต่สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะเป็นสัญญาณรบกวนที่อยู่บริเวณขอบของสัญญาณ โดย ในวงจรซีมอส (CMOS) จะมีสัญญาณรบกวนที่ขอบของสัญญาณในระดับที่สูงกว่า คือมีค่าประมาณ 0.3 เท่าของศักย์ไฟเลี้ยงวงจร หรือ 1.5 โวลท์ สำหรับไฟเลี้ยง 5 โวลท์ ด้วยคุณสมบัติของวงจรดิจิตอลนี้เอง จึงเป็นสาเหตุให้สัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่ำ ๆ เข้ามารบกวนได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 สัญญาณรบกวนในดิจิตอลลอจิก

วงจรทางอนาลอกนั้น แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่สำคัญ เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายนอกวงจร แต่สำหรับวงจรดิจิตอลแล้ว แหล่งกำเนิดหลักที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน คือแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายใน ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจาก

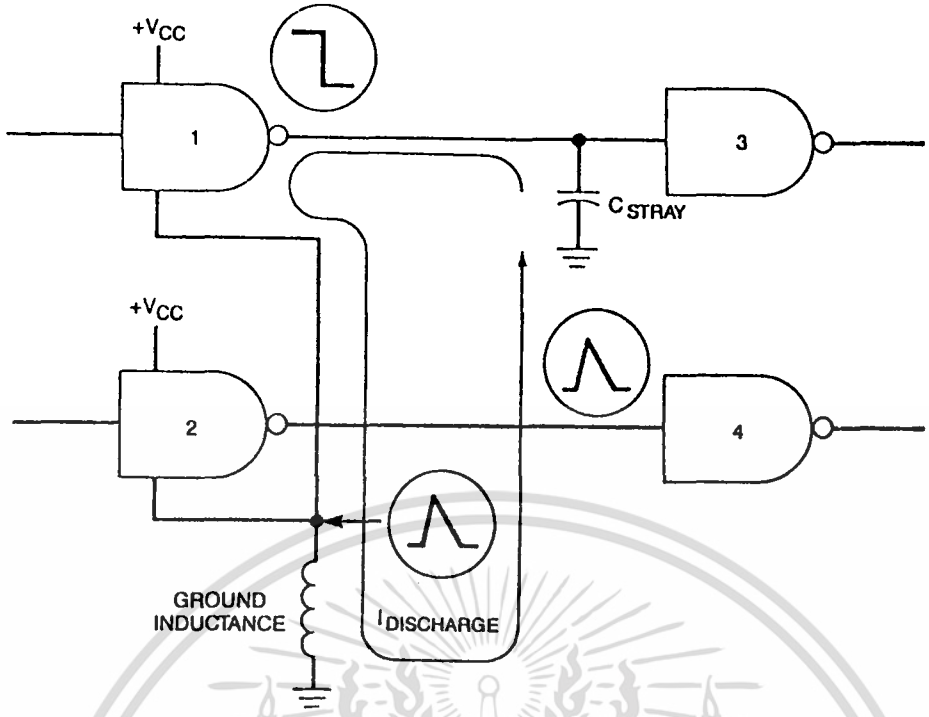
1. ระบบกราวด์
2. ระบบไฟเลี้ยงวงจร
3. การสะท้อนในสายส่งสัญญาณ
4. ครอสทอล์ค (crosstalk)

ต้นกำเนิดสัญญาณรบกวนที่สำคัญทั้งหมดนี้ได้แก่ ระบบกราวด์ และระบบไฟเลี้ยง ซึ่งปัญหาของวงจรดิจิตอลนั้น โดยปกติจะเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของสัญญาณ อัตราความผิดพลาดบริเวณนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของการสวิทชิ่ง เมื่อนำวงจรรวมมาต่อกัน ในวรจรที่มีความซับซ้อนเราไม่สามารถที่จะทำการทดสอบการสวิทชิ่งของวงจรรวมที่นำมาต่อกันทุกตัวได้ และปัญหาของ สัญญาณรบกวน อาจจะไม่สามารถตรวจพบในห้องแลปได้ทั้งหมด การที่จะออกแบบระบบให้ดีได้ จะต้องมีการวางลายวงจร และจัดอุปกรณ์อย่างเหมาะสมเพื่อที่จะทำการลดสัญญาณรบกวนแรงดัน ที่ทำการวัดได้จาก วงจรรวม วิธีการที่วัดนั้นจะทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละจุดเทียบกับกราวด์ และจะต้องวัดระดับไฟเลี้ยงเทียบกับกราวด์ ของวงจรรวมทุกตัว ซึ่งแรงดันที่วัดได้นี้จะได้นำมาเทียบกับสัญญาณรบกวนแรงดัน ที่ยอมรับได้

2.5.2 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายใน

จากรูปที่ 2.5-1 เป็นระบบดิจิตอลลอจิกอย่างง่าย ๆ ที่ประกอบไปด้วยเกต 4 ตัว เราจะพิจารณาว่ามีอะไรเกิดขึ้นบ้างเมื่อเอาท์พุทของเกทที่ 1 เปลี่ยนสถานะจาก 1 (high) เป็น 0 (low) โดยเกท ก่อนที่จะ สวิทช์ จะมีเอาท์พุทเป็น 1 และความจุระหว่างสายของเกท 1 และ 2 จะถูกชาร์จ (charge) ด้วยไฟเลี้ยง เมื่อเกท 1 ทำการสวิทช์แล้ว ตัวเก็บประจุที่เหลืออยู่ จะทำการคายประจุในสภาวะก่อนที่เกท 3 จะตรวจพบว่ามีสถานะเป็น 0 ซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแสทรานเซียนท์ปริมาณมากไหลลงสู่กราวด์ของระบบ เนื่องจากการคายประจุของตัวเก็บประจุนี้ แต่สายของกราวด์ มีความเหนี่ยวนำ จึงเป็นผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแรงดันพัลส์ขึ้นที่กราวด์ ที่ต่อกันระหว่างเกท1 และ 2 ถ้าเอาท์พุทของเกท 2 เป็น 0 สัญญาณรบกวนพัลส์ จะเข้าสู่อินพุท ของเกท 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.5-1 ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทำให้เกท 4 เกิดการสวิทช์เป็นผลให้ลอจิกที่คำนวณไว้ทำงานผิดพลาด ดังนั้นวิธีที่จะทำให้สัญญาณรบกวนแรงดันมีขนาดลดลง จะต้องทำให้ค่าความเหนี่ยวนำของระบบกราวด์มีขนาดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



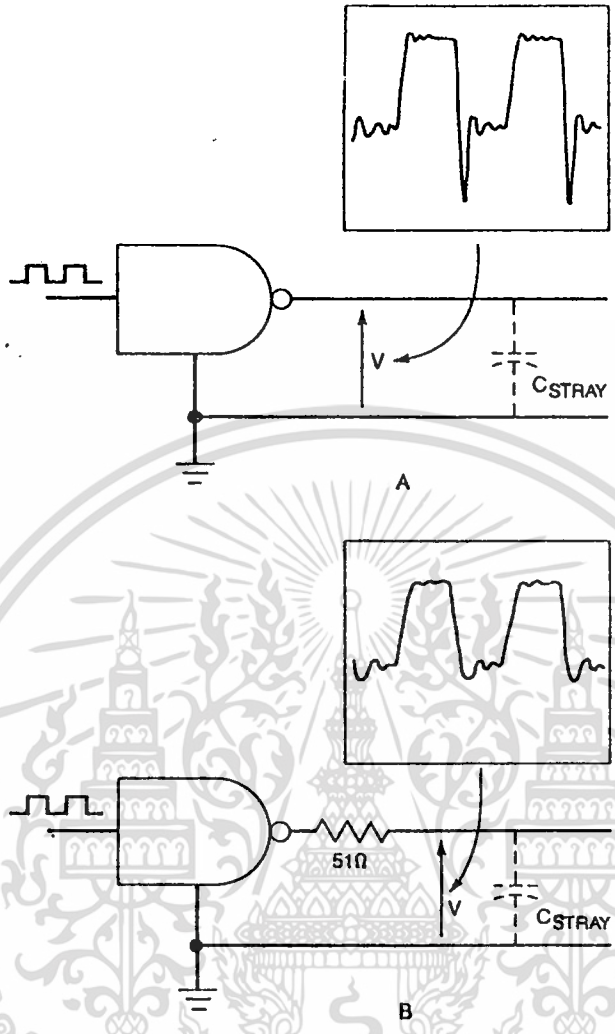
รูปที่ 2.5-1 ระบบดิจิตอลลอจิกอย่างง่าย

นอกจากนี้การคายประจุของตัวเก็บประจุที่เหลืออยู่ ที่เอาท์พุทของเกท1 ยังเป็นผลทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่ขอบของสัญญาณ เนื่องจากตัวนำในกราวด์มีค่าความต้านทานน้อยๆ อยู่ ซึ่งถ้าพิจารณาแล้วจะเห็นว่าเหมือนกับเป็นตัวออสซิลเลอเตอร์ (oscillator) เนื่องจากเอาท์พุทของเกท1 เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 จึงมีค่าเป็นลบ จากรูปที่แสดงในวงจร2.5-2 ค่า Q (ส่วนขยายของการเรโซแนนซ์) จะมีค่าเป็น

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (2\text{-}20)$$

การแก้ไขอาจจะใช้การหน่วงด้วยการเพิ่มความต้านทาน (ดังภาพที่ 2.5-2B) หรือหยอดสารเฟอร์ไรท์ (ferrite bead) ที่เอาท์พุทของเกท 1 จะช่วยลดการสั่นของสัญญาณได้ อาจจะใช้วิธีต่อไดโอดแบบไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) ที่เอาท์พุทของเกท เพื่อทำการยกระดับการสั่นของแรงดันค่าลบ และจำกัดแอมปลิจูด (amplitude) ที่ตกคร่อมไดโอด แต่ถ้าเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 วิธีข้างต้นแล้ว วิธีที่ดีกว่าจะเป็นการใช้ ตัวต้านทานมาทำการลดทอน เพราะเมื่อเราใส่ตัวต้านทานในวงจรแล้ว กระแสที่ไหลก็จะลดลง เป็นการลดพลังงานที่ทำให้เกิดการสูญเสียได้ในรูปของความร้อน และเป็นการขจัดแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนด้วย เพราะถ้าใช้ไดโอด จะทำให้กระแสไหลผ่านตัวมันได้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

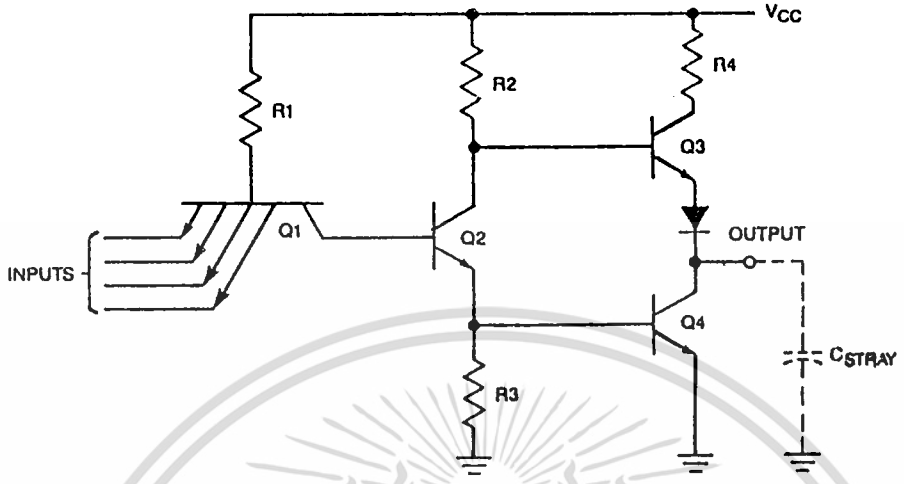


รูปที่ 2.5-2 รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุท

แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในลอจิกดิจิตอลอย่างที่ 2 แสดงได้ในรูปที่ 2.5-3 เป็นภาพวงจรสมมูลแทนลอจิกเกท ที่มีเอาท์พุทเป็นแบบโทเทมโพล (totem pole คือมีทรานซิสเตอร์2 ตัว Q3 และ Q4) เมื่ออินพุททั้งหมดต่อลงกราวด์ ทรานซิสเตอร์ 1 จะเปิดทำให้ทรานซิสเตอร์ 2 และ 4 ปิด ดังนั้นทรานซิสเตอร์ Q3 จะถูกขับโดยการจ่ายกระแสผ่าน R2 และทรานซิสเตอร์ Q3 จะทำหน้าที่ขยายกระแสเพื่อจ่ายกระแสให้กับตัวเก็บประจุที่โหลดอยู่ แต่กระแสจะถูกจำกัดด้วย R4 เพื่อทำให้การสวิทช์ได้ด้วยความเร็ว R4 จะต้องมีค่าความต้านทานน้อยๆ (ประมาณ 50-150 โอห์ม)

การชาร์จประจุไปที่ตัวเก็บประจุที่โหลดอยู่ เป็นวงจรซีรีย์เรโซแนนซ์ (series-resonance) โดยมีทิศทางเดินของกระแสจากไฟเลี้ยงผ่าน R4, ทรานซิสเตอร์ Q3 และตัวเก็บประจุที่โหลดอยู่จนถึงกราวด์ แต่วงจรนี้ไม่ทำให้เกิดปัญหาเนื่องจากมี R4 ทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5-3 เกทที่มีเอาท์พุทเป็นแบบโทเทมโพล

เกทที่มีเอาท์พุทเป็นแบบโทเทมโพล จะมีปัญหาคือทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่มีความสัมพันธ์กับสถานะลอจิก โดยเมื่อเอาท์พุท มีสถานะเป็น "1" จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q3 เปิด และ Q4 ปิด ในทางกลับกันเมื่อเอาท์พุทมีสถานะเป็น "0" จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q3 ปิด และ Q4 เปิด ในสภาวะทั้งสองนี้จะทำให้เกิดเป็นสภาวะอิมพีแดนซ์สูง (high impedance) ระหว่างแหล่งจ่ายไฟ และกราวด์ อย่างไรก็ตามในขณะที่เกททำการสวิทช์ มันจะมีช่วงเวลาสั้นๆ ที่ทั้ง Q3 และ Q4 เปิด พร้อมกัน ผลเนื่องมาจากการเหลื่อมซ้อนกันนี้เอง เป็นผลให้ความต้านทานระหว่าง ไฟเลี้ยงและ กราวด์ต่ำมาก จึงทำให้เกิดกระแสกระชากจากไฟเลี้ยงไปสู่กราวด์ ขึ้นประมาณ 30-100 มิลลิแอมแปร์

การที่ลอจิกมีการสวิทช์จาก 1 เป็น 0 จะทำให้เกิดกระแสทรานเซียนท์ปริมาณมากไหลจากไฟเลี้ยงไปสู่กราวด์ ซึ่งกระแสที่ไหลนี้จะทำให้เกิดการชาร์จไปที่ตัวเก็บประจุที่ทำการโหลดอยู่ และทำให้เอาท์พุทของวงจรโทเทมโพลถูกลัดวงจร (short circuit เนื่องจากเป็นสัญญาณความถี่สูง) จากกระแสที่ไหลผ่านสายไฟเลี้ยงและสายของกราวด์ จะทำให้เกิดสัญญาณทรานเซียนท์แรงดันตกคร่อมที่ไฟเลี้ยง เนื่องจากทั้งสายไฟเลี้ยงและกราวด์มีค่าความเหนี่ยวนำ การแก้ไขจึงทำได้โดยการใส่แหล่งกำเนิดประจุ (ตัวเก็บประจุ) ไว้ใกล้ๆ กับเกทแต่ละตัว เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสทรานเซียนท์ โดยไม่มีการดึงกระแสทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่สายของไฟเลี้ยงและสายของกราวด์

จากสาเหตุที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ วิธีการที่จะใช้ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนภายใน จะต้องทำการออกแบบระบบดิจิตอลโดยการคำนึงถึง

1. การทำให้ค่าเหนี่ยวนำจากกราวด์ของระบบมีค่าน้อยที่สุด
2. มีแหล่งจ่ายประจุไว้ใกล้ๆ กับลอจิกเกทแต่ละตัว (กำจัดความเหนี่ยวนำจากระบบจ่ายไฟ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกราวด์ของวงจรดิจิตอล

สัญญาณรบกวนที่เกิดเนื่องมาจากระบบกราวด์ จะมีปัญหามากกว่าสัญญาณรบกวนจากระบบจ่ายไฟเลี้ยง เพราะจะเป็นปัญหาจากทั้งกระแสทรานเซียนท์ จากระบบไฟเลี้ยง และการที่กระแสไหลย้อนกลับสู่กราวด์ ปัญหาที่เกิดจากกระแสทรานเซียนท์ในระบบไฟเลี้ยงสามารถแก้ไขได้ ด้วยการเลือกตัวเก็บประจุที่มีค่าเหมาะสมมาต่อดีคัปปลิ้ง (decoupling) แต่ปัญหาคือกระแสของสัญญาณในกราวด์ไม่สามารถใช้วิธี ดีคัปปลิ้ง และบายพาส (bypass) แก้ไขได้

กระแสกราวด์ทรานเซียนท์ เป็นต้นกำเนิดทั้งสัญญาณรบกวนแรงดันภายในและการนำการปล่อยคลื่นวิทยุด้วยการแผ่รังสี การลดสัญญาณรบกวนเนื่องจากสัญญาณทรานเซียนท์ในกราวด์ ทำโดยการลดค่า อิมพีแดนซ์ของกราวด์ให้น้อยลง โดยทั่วไปลายตัวนำในแผ่นวงจร (ความกว้าง 0.02 นิ้ว มีพื้นกราวด์อีกด้านหนึ่งของแผ่น) จะมีความต้านทาน 12 มิลลิสแควร์/นิ้ว, ค่าความจุ 20 พิโคฟารัด/นิ้ว และความเหนี่ยวนำ 15 นาโนเฮนรี่/นิ้ว ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพิแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ 15 นาโนเฮนรี่ และความถี่กับช่วงเวลาขาขึ้นและลง เป็นไปตามสมการ 2-19 และแสดงไว้ในตารางที่ 3

ความถี่ (MHz)	ช่วงเวลาขาขึ้น (ns)	อิมพีแดนซ์ (Ω)
1	318	0.1
10	31.8	1.0
30	10.6	2.8
50	6.4	4.7
70	4.5	6.6
90	3.5	8.5
110	2.9	10.4
160	2.0	15.0

ตารางที่ 3 อิมพีแดนซ์ของแผ่นวงจร

จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่าสัญญาณความถี่ในวงจรดิจิตอล (10-150 เมกกะเฮิรท์) จะทำให้อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ 15 นาโนเฮนรี่มีค่าสูงกว่าตัวต้านทาน 12 มิลลิโอห์ม ถ้าสัญญาณดิจิตอลที่มีขอบขาขึ้น 3 นาโนวินาที จะทำให้ตัวนำกราวด์มีความต้านทานเหนี่ยวนำประมาณ 10 โอห์ม/นิ้ว จึงเห็นได้ว่าค่าความเหนี่ยวนำจะมีความเกี่ยวข้องกับการวางลายวงจร ถ้ากราวด์อิมพิแดนซ์ของวงจรมีค่าลดลงแล้ว ค่าความเหนี่ยวนำของกราวด์จะมีค่าลดลงได้ ตามขนาดของอิมพิแดนซ์ที่ลดลงหรือมากกว่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 วิธีลดค่าความเหนี่ยวนำในวงจร (Minimizing Inductance)

ก่อนที่จะทำการควบคุมค่าความเหนี่ยวนำจะต้องทราบถึงความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของวงจรก่อน

ค่าความเหนี่ยวนำแปรผันตรงกับความยาวของตัวนำ ดังนั้นการออกแบบที่ดีจะต้องทำให้สายตัวนำกระแสสัญญาณทรานเซียน์มีขนาดสั้น เช่น สายนำสัญญาณนาฬิกาและสายบัสไดร์เวอร์ เป็นต้น ซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถใช้กับวงจรขนาดใหญ่ได้! เพราะจะต้องใช้สายในการเชื่อมต่อที่ยาว แต่อาจจะแก้ไขได้โดยใช้เทคนิคการรวมเป็นวงจรขนาดใหญ่ คือใส่วงจรทั้งหมดลงไปในไอซีตัวเดียว ซึ่งจะช่วยลดความยาวและการเหนี่ยวนำภายในตัวนำให้น้อยลง

นอกจากนี้ค่าความเหนี่ยวนำยังแปรผกผันกับลอการิทึมของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือความกว้างของสายตัวนำ โดยสายตัวนำกระแสกับค่าความเหนี่ยวนำจะเท่ากับ

$$L = 0.005 \ln\left(\frac{4h}{d}\right) \qquad (2\text{-}21)$$

เส้นผ่านศูนย์กลางคือ d และกระแสย้อนกลับสูงสุดคือ h ถ้าลายตัวนำแผ่นปริ้นท์มีความกว้าง w จะมีค่าความเหนี่ยวนำเป็น

$$L = 0.005 \ln\left(\frac{2\pi h}{w}\right) \qquad (2\text{-}22)$$

ถ้าให้สมการที่ 2-21 เท่ากับ 2-22 แล้วเส้นลายพิมพ์ กว้าง w จะมีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับสายตัวนำเส้นผ่านศูนย์กลาง d จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$w = 1.57d \qquad (2\text{-}23)$$

จากสมการที่ 2-23 บอกได้ว่าลายตัวนำและเส้นตัวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากันพื้นจะต้องมีพื้นที่ผิวเท่ากัน

ความสัมพันธ์ในสมการ 2-21 และ 2-22 เป็นแบบลอการิทึม จึงไม่เหมาะที่จะลดค่าความเหนี่ยวนำมากๆ ด้วยการเพิ่มขนาดของลวดตัวนำ ในกรณีปกติถ้าเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างเป็น 2 เท่า(เพิ่ม 100เปอร์เซ็นต์) จะช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำได้ 20เปอร์เซ็นต์ และจะต้องเพิ่มขนาดเป็น 500เปอร์เซ็นต์ จึงจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลงไป 50เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ลายวงจรมีขนาดเล็กก็สามารถใช้วิธีการนี้ได้แต่ถ้าต้องการจะลดค่าความเหนี่ยวนำมากๆแล้ว จะต้องใช้วิธีการอื่นที่ดีกว่านี้แทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหนึ่งที่ใช้ลดค่าความเหนี่ยวนำในวงจรคือ ทำให้มีกระแสไหลได้หลายทางในรูปของไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องต่อกันในทางกายภาพ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการต่อสายตัวนำขนานกันนั่นเอง ถ้ามีตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัววางขนานกันค่าความเหนี่ยวนำรวมจะมีค่าลดลงเป็นครึ่งหนึ่งโดยไม่พิจารณาความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) ถ้ามีสายตัวนำ 4 สายขนานกันความเหนี่ยวนำจะมีค่าเป็น 1/4 ของสายตัวนำตัวเดียว เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำแปรผกผันกับจำนวนสายที่ขนานกัน ดังนั้นวิธีการนี้จึงมีผลเป็นอย่างมากในการใช้ลดค่าความเหนี่ยวนำ

ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

เมื่อตัวนำ2 ตัววางขนานกันจะต้องพิจารณาผลเนื่องจากความเหนี่ยวนำร่วม ในค่าเหนี่ยวนำสุทธิด้วย ความเหนี่ยวนำสุทธิของสายตัวนำ 2 ตัวที่มีกระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวกันเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้

$$Lt = \frac{L1L2 - M^2}{L1 + L2 - 2M} \qquad (2\text{-}24)$$

เมื่อ L1 และ L2 คือค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละตัวนำและ M เป็นความเหนี่ยวนำร่วม ระหว่าง 2 ตัวนำ ถ้าตัวนำทั้ง 2 ตัวเป็นแบบอุดมคติ (L1 และ L2 มีขนาดเท่ากัน) เขียนสมการที่ 2-24 ใหม่ได้เป็น

$$Lt = \frac{L1 + M}{2} \qquad (2\text{-}25)$$

สมการที่ 2-25 แสดงให้เห็นว่าความเหนี่ยวนำร่วม เป็นตัวจำกัดค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกัน ถ้าตัวเหนี่ยวนำอยู่ชิดกัน (tightly coupled) จะทำให้ความเหนี่ยวนำร่วม มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ (L1=M) และค่าความเหนี่ยวนำสุทธิจะมีค่าเท่ากับค่าเหนี่ยวนำเริ่มต้นของตัวนำตัวเดียวในกรณีที่ตัวนำแต่ละตัววางห่างจากกัน จะสามารถตัดความเหนี่ยวนำร่วมทิ้งได้ และความเหนี่ยวนำสุทธิจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเหนี่ยวนำตัวเดียว ด้วยเหตุนี้การวางตัวนำจึงมีผลกับค่าความเหนี่ยวนำร่วมด้วย

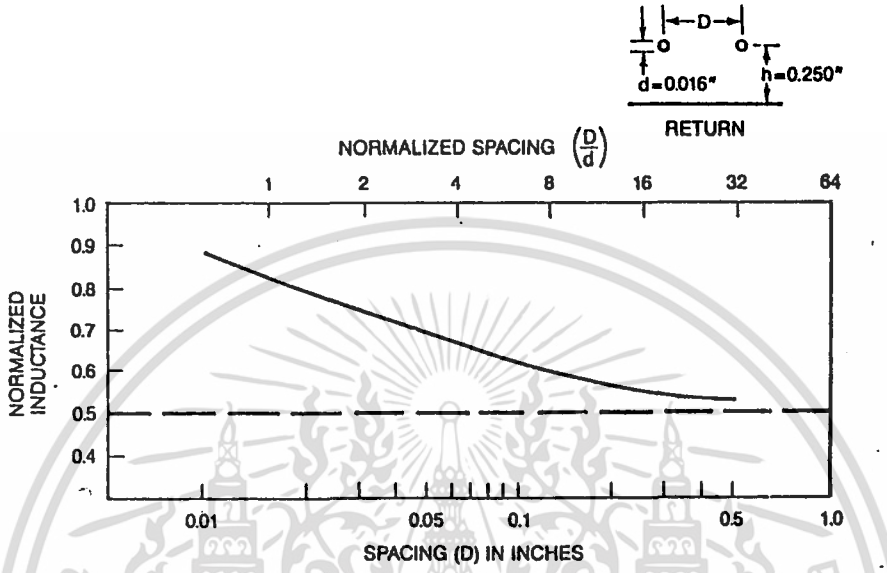
ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างตัวนำ 2 ตัวแยกห่างจากกันเป็นระยะทาง D และตัวอยู่สูงจากกราวด์ระนาบ h มีความสัมพันธ์เป็น

$$M = 0.0025 \ln\left(1 + \left(\frac{2h}{D^2}\right)^2\right) \qquad (2\text{-}26)$$

ค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากการวางตัวนำขนานกันจะต้องใช้สมการที่ 2-21 , 2-25 และ 2-26 ในการพิจารณา จากภาพที่ 2.5-4 เป็นผลของค่าความเหนี่ยวนำรวมของตัวนำ 2 ตัว ถ้าตัวนำวางห่างจากกันน้อยกว่า 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงประมาณ 25 เปอร์เซนต์ แต่ถ้าตัวนำวางห่างจากกันเป็นระยะทาง 1/10 นิ้วหรือมากกว่านั้นแล้วค่าความเหนี่ยวนำร่วมสามารถละทิ้งได้ไม่ต้องพิจารณา



รูปที่ 2.5-4 เป็นค่าความเหนี่ยวนำรวมของตัวนำ 2 ตัวที่วางห่างกันในระยะต่างๆ

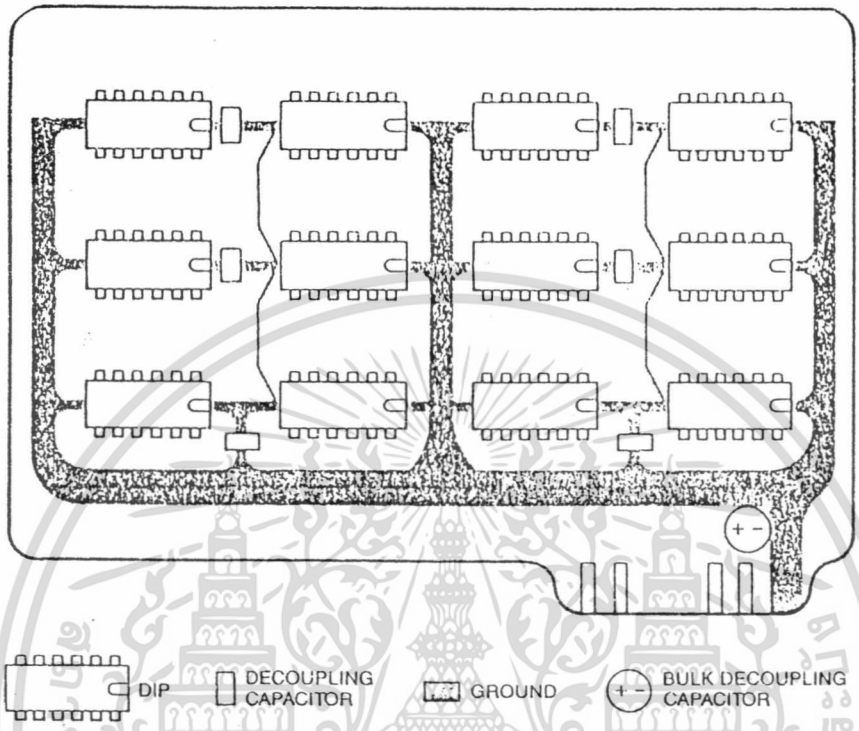
2.5.5 ระบบกราวด์ที่เหมาะสมในวงจรดิจิตอล

ระบบกราวด์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรดิจิตอลความเร็วสูงนั้น จะต้องมีความต้านทานต่ำ (เพื่อความเหนี่ยวนำที่ต่ำ) โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างไอซีทั้งหมดเท่าที่จะทำได้ วิธีการที่ทำกราวด์ให้มีลักษณะเช่นนี้คือการต่อกราวด์หลายๆเส้นเชื่อมถึงกัน ถึงแม้ว่าบางเส้นที่มีขนาดเล็กก็ยังดีกว่าที่จะไม่เชื่อมต่อถึงกันเลย อย่างไรก็ตามเราไม่อาจเชื่อมกันเป็นจำนวนอนันต์ได้ ดังนั้นวิธีการที่ดีกว่านี้จึงเป็นการใช้แผ่นกราวด์ซึ่งจะทำให้ได้คุณสมบัติกราวด์ที่เหมาะสม แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่ตรงที่ต้องใช้พื้นที่ของโหลดมากหรืออาจทำให้มีราคาในการผลิตสูงขึ้นเพราะต้องใช้บอร์ดหลายชิ้น

แต่ก็มีวิธีการที่ใช้ลดค่าความเหนี่ยวนำให้น้อยลงจนเกือบจะเท่ากับการใช้พื้นที่กราวด์ได้โดยการใช้ระบบกราวด์แบบตาราง จะมีสายกราวด์วางทั้งแนวตั้งและแนวขวางพิจารณาได้จากภาพที่ 2.5-5 ระยะห่างระหว่างกราวด์ที่วางแบบตารางแต่ละเส้นจะเว้นว่างไว้เป็นขนาด 0.5 นิ้ว ถ้าต้องการให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นต้องวางให้ห่างจากกันเพิ่มขึ้นเป็น 1.5-2 นิ้ว ข้อควรปฏิบัติเพื่อทำให้ระบบดีขึ้นคือควรจะต้องมีการวางกราวด์แบบตารางผ่านไอซีทุกตัวบนบอร์ด ซึ่งจะทำให้ไอซีทุกตัวมีระบบกราวด์ที่เหมาะสมผ่าน การที่ใช้วิธีกราวด์ตารางนี้จะทำให้มีการจัดเรียงอุปกรณ์บนบอร์ดได้อย่างหนาแน่นมาก ยิ่งในกรณีที่ใช้แผ่นปรินท์ 2 หน้าจะใช้ด้านหนึ่งเป็นกราวด์แนวขวาง และอีกด้านหนึ่งเป็นกราวด์แนวตั้ง โดยแต่ละข้างจะเชื่อมต่อกันเมื่อถึงจุดตัดกันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราวด์ การวางไอซีจะต้องคำนึงถึงการเชื่อมสายสัญญาณภายในบอร์ดด้วย โดยจะต้องเว้นที่ว่างไว้อย่างเหมาะสม



รูปที่2.5-5 การวางกราวด์ในวงจรแบบตาราง

การใช้กราวด์วางแบบตารางเป็นระบบกราวด์ในวงจรที่มีความหนาแน่นสูง ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งสิ่งที่สำคัญก็คือจะต้องมีการวางกราวด์แบบตาราง ก่อนที่จะทำการต่อขาสัญญาณเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ถึงแม้ว่าจะมีความยุ่งยากในการต่อวงจรเพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้วงจรมีราคาสูงขึ้น

จากภาพถึงแม้ว่าในตอนต้นจะใช้กราวด์ที่มีขนาดกว้างๆ ในการควบคุมกระแสซึ่งมีวิธีการวางกราวด์แบบตารางนี้ แต่ไม่เหมาะที่จะใช้กับตัวนำที่มีขนาดแคบๆ เพราะว่าตัวนำที่ต่อเข้าในวงจรจะเป็นการเพิ่มส่วนที่ต่อขนานเข้ากับกราวด์จะทำให้เป็นการเพิ่มความเหนี่ยวนำรวมได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ไม่ควรใช้ตัวนำแคบๆ มาทำกราวด์

การวางกราวด์แบบตารางนี้ จะช่วยลดสัญญาณรบกวนแรงดันอันเนื่องมาจากกราวด์ได้ ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ 4 แสดงถึงกราวด์-สัญญาณรบกวนแรงดัน ที่วัดได้จากขากราวด์ของไอซี แต่ละตัวโดยใช้สายและอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติตามทฤษฎี เปรียบเทียบระหว่างไม่มีการวางกราวด์แบบตารางและมีการวางกราวด์แบบตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement Locations	Single-Point Ground	Ground Grid
IC1-IC2	150	100
IC1-IC3	425	150
IC1-IC4	425	150
IC1-IC5	450	150
IC1-IC6	450	150
IC1-IC7	450	150
IC1-IC8	425	225
IC1-IC9	400	175
IC1-IC10	400	150
IC1-IC11	625	200
IC1-IC12	400	150

ตารางที่ 4 แสดงค่าผลความแตกต่างของการเกิดสัญญาณรบกวนของ 2 วิธี

ในกรณีตัวอย่างนี้ผลการลดแรงดันของกราวด์จะลดได้มากในช่วง 1000 ถึง 250 มิลลิโวลท์

ในระบบกราวด์ที่ใช้แบบตารางนี้ จะให้สัญญาณรบกวนแรงดันบริเวณกราวด์สูงกว่าระบบวางแบบพื้นที่กราวด์เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของบอร์ดโดยรวมแล้ว การวางกราวด์แบบตารางจะสามารถมีขนาดบอร์ดที่เล็กกว่า

สำหรับวงจรดิจิตอลแล้ว ระบบกราวด์ถือว่าเป็นพื้นฐานในการวางลายวงจรเพราะถ้าระบบกราวด์ไม่ดีแล้วก็เป็นการลำบากที่จะแก้ไขสภาวะการณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการกระชากของไฟเลี้ยงในช่วงใกล้ขอบขาและการออกแบบคุณสมบัติของกราวด์ ด้วยเหตุนี้เองในวงจรดิจิตอลแล้วจะต้องมีระบบกราวด์เป็นแบบพื้นที่กราวด์ หรือไม่ก็เป็นแบบการวางกราวด์แบบตาราง

พื้นที่ลูป (Loop area)

มีวิธีการสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ใช้ในการลดค่าความเหนี่ยวนำในขณะที่วงจรกำลังทำงานได้ ก็คือทำให้พื้นที่ที่มีกระแสไหลครบลูปมีค่าน้อยที่สุด โดยตัวนำที่มีกระแสไหลสวนทิศทางกัน จะมีความเหนี่ยวนำสุทธิเท่ากับ

$$L_t = L_1+L_2-2M \qquad (2\text{-}27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_1 และ L_2 คือค่าความเหนี่ยวนำแต่ละตัว และ M คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างตัวนำ ถ้าสภาพการณ์ในอุดมคติ (L_1=L_2) จะลดรูปสมการได้เป็น

$$L_t = 2(L_1\text{-}M) \qquad (2\text{-}28)$$

การลดค่าความเหนี่ยวนำรวมของส่วนที่มีกระแสไหลสมบูรณ์ จะต้องทำให้มีค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างตัวนำมีค่ามากที่สุด ซึ่งก็คือการวาง 2 ตัวนำให้ใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดพื้นที่ของลูปให้ต่ำที่สุด

ถ้าสัมประสิทธิการส่งผ่านสนามแม่เหล็ก k ระหว่างตัวนำทั้งสองเป็น 1 ค่าความเหนี่ยวนำร่วม จะมีค่าเท่ากับค่าความเหนี่ยวนำของเส้นลวดเองเพราะมีความสัมพันธ์เป็น

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \qquad (2\text{-}29)$$

และจะทำให้ความเหนี่ยวนำสุทธิมีค่าเป็น 0 วงจรความถี่สูงและสายโคแอกเซียล (coaxial) เป็นไปตามสภาวะในอุดมคติดังที่กล่าวมาแล้ว

การวางสายที่มีกระแสไหลสวนทิศทางไว้ให้ใกล้กันมากที่สุด ก็เป็นวิธีที่จะใช้ลดค่าความเหนี่ยวนำได้เช่นกัน วิธีนี้ใช้ได้กับสายทวิสท์แพร์ (twisted pair ,สายคู่) ที่วางชิดกันมาก หรือสายโคแอกเซียล โดยจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำลดลงได้ต่ำกว่า 1 นาโนเฮนรี่/นิ้ว

สิ่งที่ทำให้พื้นที่ลูปมีความสำคัญก็คือการที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในสายสวนทิศทางกัน ซึ่งเป็นวิธีใช้พิจารณากระแสไหลกลับสู่ระบบรวมกราวด์ โดยปกติแล้วนักออกแบบจะละเลยข้อนี้กันไป

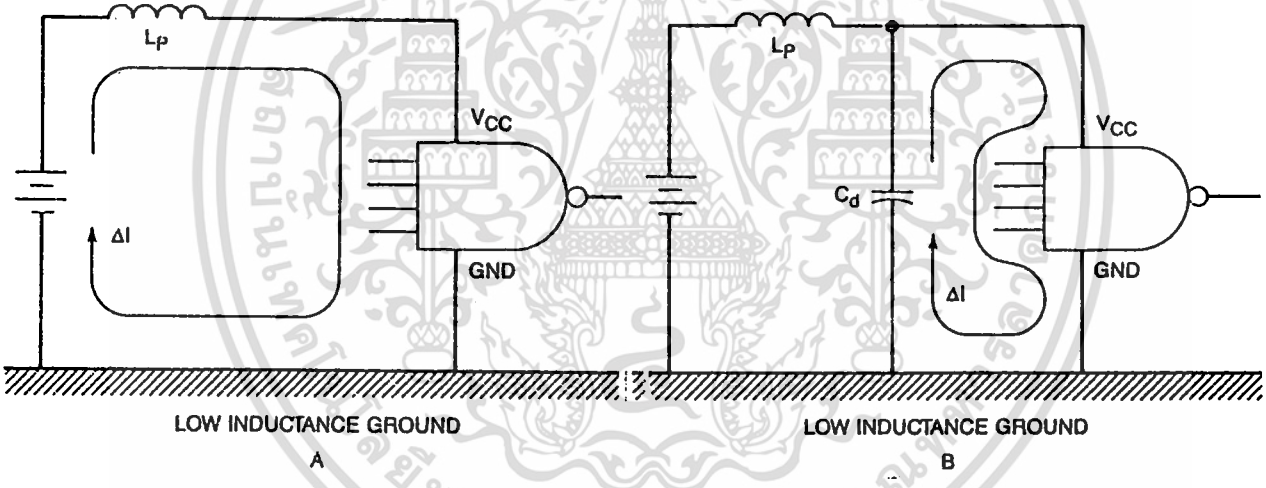
2.5.6 การจ่ายพลังงาน (Power Distribution)

ในทางอุดมคติแล้วลายวงจรของระบบไฟเลี้ยงก็จะเหมือนกับระบบกราวด์ และต้องวางตัวขนานกันด้วย ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการนี้ถ้าไม่จำเป็น เพราะว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบแหล่งจ่ายกระแสไฟสามารถควบคุมได้ ด้วยวิธีการต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งกับระบบวางแหล่งจ่ายไฟแบบตาราง หรือวางแบบพื้นที่ของแหล่งจ่ายไฟไม่สำคัญเท่ากับระบบกราวด์ ดังนั้นถ้าไม่มีความจำเป็นที่จะใช้ระบบวางแหล่งจ่ายไฟแบบตาราง ก็ควรที่จะทำระบบกราวด์ให้ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ แล้วใช้วิธีการอื่นทำการควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดจากไฟเลี้ยงแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดีคัปปลิ้งแหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply Decoupling)

ถึงแม้ว่าวงจรที่เราออกแบบไว้จะมีระบบกราวด์ที่ดีแล้ว แต่ก็ยังไม่สามารถขจัดปัญหารบกวนวงจรได้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.5-6(a) อธิบายได้ว่า เมื่อมีการสวิทช์ของลอจิกเกท จะมีกระแสทรานเซียนท์ (di) ไหล ทำให้เกิดมีกระแสไหลในสายของแหล่งจ่ายกระแสไฟอย่างรวดเร็ว ซึ่งกระแสทรานเซียนท์ นี้จะให้ผ่านทั้งระบบไฟเลี้ยง และระบบกราวด์ แต่เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในกราวด์ ถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้แล้ว ปัญหาสำคัญจึงตกอยู่กับการมีแรงดันส่วนหนึ่งตกคร่อมระหว่างตัวเหนี่ยวนำ Lp ในสายไฟเลี้ยง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการมีกระแสทรานเซียนท์ไหลผ่านตัวนำ จึงทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแรงดันขนาดใหญ่ที่ แหล่งจ่ายไฟของลอจิกเกท



รูปที่ 2.5-6 กระแสของแหล่งจ่ายไฟที่มีตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งและที่ไม่มี

เพราะฉะนั้นวิธีการที่จะลดขนาดแรงดันทรานเซียนท์ของระบบไฟเลี้ยง ทำได้ด้วยการลดค่าความเหนี่ยวนำ Lp และ หรือลดกระแสทรานเซียนท์ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ การลดค่าความเหนี่ยวนำทำได้โดย วางเป็นพื้นที่ของแหล่งจ่ายไฟ หรือวางแหล่งจ่ายไฟเป็นแบบตาราง ส่วนการลดกระแสทรานเซียนท์ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำให้ลดลงหรือแยกออกจากตัวเหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยใช้ตัวจ่ายกระแสจากแหล่งอื่น เช่นทำการต่อตัวเก็บประจุไว้ใกล้ๆกับขาแหล่งจ่ายไฟของลอจิกเกท ดังแสดงในรูปที่ 2.5-6(b) ซึ่งสัญญาณรบกวนแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง (Cd) และสายที่ต่อระหว่างตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวลอจิกเกทแทน ดังนั้นการเลือกชนิดของตัวเก็บประจุ ค่าความจุ และตำแหน่งของตัวเก็บประจุกับไอซี จะเป็นส่วนสำคัญในการลดสัญญาณรบกวน ถ้าเลือกได้เหมาะสม

ถึงแม้ว่าจะมีการวางระบบไฟเลี้ยงด้วยพื้นที่ของแหล่งจ่ายไฟ หรือการวางแหล่งจ่ายไฟแบบตาราง แต่วงจรนั้นยังคงต้องต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง เพื่อให้ทำหน้าที่ควบคุมการแผ่รังสี เนื่องจากมีกระแสทรานเซียนท์ไหลจากแหล่งจ่ายกระแสไฟ รูปที่2.5-6 แสดงให้เห็นถึงการลดลูปของกระแสให้เล็กลงซึ่งเป็นสาเหตุให้การแผ่คลื่นวิทยุมีขนาดลดลงตามไปด้วย

ขนาดของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง (Bulk Decoupling Capacitor)

ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งที่ต่อให้กับไอซีนั้น จะต้องมีการชาร์จประจุซ้ำ ซึ่งการชาร์จกระแสนี้จะมีความถี่ในการชาร์จต่ำกว่าความถี่ในการดึงกระแสจากไอซี จึงต้องมีการสนับสนุนกระแสจากขนาดของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งบนลายไฟเลี้ยงในแผ่นวงจร ซึ่งการกำหนดค่าขนาดของตัวเก็บประจุนั้น ไม่ได้ยุ่งยากนักเพียงแต่จะต้องมีค่ามากกว่า 10 เท่าของผลรวมค่าตัวเก็บประจุที่ต่อดีคัปปลิ้งอยู่ ตัวดีคัปปลิ้งจะต้องต่อติดกับจุดที่แหล่งจ่ายไฟเข้ามายังบอร์ด (พิจารณารูปที่ 2.5-5) ถ้ามีไอซีมากกว่า 20 ตัวบนบอร์ด จะมีการใช้ ตัวเก็บประจุที่ดีคัปปลิ้ง มากกว่า 1 ตัว วางกระจายในบอร์ด โดยคิดตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง 1 ตัว ต่อไอซี 15-20 ตัว

ขนาดของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง จะมีค่าความเหนี่ยวนำในวงจรสมมูลตัวเก็บประจุขนาดน้อยๆ ซึ่งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมก็คือแทนทาลัมอิเลคโตรไลท์ (tantalum electrolytic) หรือเมทัลไลท์โพลีคาร์บอเนต (metalized polycarbonate capacitors) เนื่องจากทั้งคู่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในที่น้อยมาก ส่วนในชนิดอะลูมินัมอิเลคโตรไลท์ (Aluminum electrolytic capacitor) จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงเกินกว่าจะนำมาใช้งานได้

ในระบบไฟเลี้ยงนั้น สัญญาณรบกวนภายนอกสามารถวิ่งเข้าสู่ระบบ และสัญญาณรบกวนภายใน ก็ใช้เส้นทางเดียวกันในการวิ่งจากระบบออกรบกวนอุปกรณ์ภายนอก ดังนั้นการกรองกระแสที่เส้นทางเดินไฟจะต้องมีมาตรฐานการออกแบบอย่างเหมาะสม โดยในระบบไฟเลี้ยงของวงจรความถี่สูง จะมีกระแสทรานเซียนท์ที่เราจะต้องจำกัดให้อยู่เฉพาะภายในแผ่นวงจรของบอร์ดดิจิตอลลอจิก และไม่ให้ออกมาที่สายของไฟเลี้ยงด้วยการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ (1-10ไมโครเฮนรี่) หรือหยอดสารเฟอร์ไรท์ไว้ข้างๆ ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง เพื่อที่จะทำให้ลดกระแสทรานเซียนท์ ที่จะไหลออกไปสายไฟเลี้ยงและยังเป็นการลดการแผ่รังสีด้วย

ชนิดและค่าของตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในงานความถี่สูง จะต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ โดยตัวเก็บประจุที่เหมาะสมจะทำหน้าที่ดีคัปปลิ้งสัญญาณ (15-150 เมกกะเฮิรทซ์) ควรใช้เป็นแบบเซรามิก หรือเซรามิกแบบหลายชั้น (multilayer ceramic capacitors)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง จะต้องมีความเหมาะสมที่จะจ่ายกระแสให้กับไอซีได้ในขณะที่ไอซีสวิทช์ ซึ่งค่าต่ำสุดของตัวเก็บประจุคำนวณได้จาก

$$c = \frac{dIdt}{dV} \qquad (2\text{-}30)$$

เมื่อ dV คือ แรงดันทรานเซียนท์ที่ตกคร่อมแหล่งจ่ายแรงดัน เป็นสาเหตุให้เกิดกระแสทรานเซียนท์ dI ไหลเป็นเวลา dt จากตัวอย่างถ้าไอซีต้องการกระแสทรานเซียนท์ 50 มิลลิแอมแปร์ ในเวลา 2 นาโนเซคคันและมีแรงดันทรานเซียนท์ น้อยกว่า 0.1 โวลท์ ตัวเก็บประจุจะมีค่าน้อยที่สุดคือ 0.001ไมโครฟารัด

นักออกแบบส่วนมาก มักชอบใช้ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งให้มีขนาดใหญ่เกินกว่าค่าที่เหมาะสมจะใช้ในงานนั้น เนื่องจากตัวเก็บประจุทุกตัวจะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่กับตัวมันเสมอ ซึ่งความเหนี่ยวนำนี้อาจจะเกิดขึ้นมาจาก โครงสร้างของตัวเก็บประจุเอง, การนำกระแสของตัวเก็บประจุ และจากส่วนภายนอกที่ใช้ต่อตัวเก็บประจุเข้ากับตัวไอซี เพราะมีการรวมตัวกันของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำนี้เอง จึงมีความถี่บางค่าที่ตัวเก็บประจุทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้ในตัวมันเอง ณ จุดที่มันเกิดเรโซแนนซ์นั้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก จึงทำให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณได้ ส่วนความถี่ที่ไม่อยู่ในช่วงเรโซแนนซ์จะมีสภาวะเป็นการเหนี่ยวนำ ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก จึงเป็นผลให้มันมีคุณสมบัติไม่ดีในการดีคัปปลิ้งสัญญาณเกินช่วงของตัวมัน ความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (2\text{-}31)$$

ในกรณีที่ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง มีค่า 0.001ไมโครฟารัด มีค่าความเหนี่ยวนำภายใน 1 นาโนเฮนรี่ ถ้าสายตัวนำที่เชื่อมต่อกับไอซี มีค่าความเหนี่ยวนำ 30 นาโนเฮนรี่ มันจะเกิดการเรโซแนนซ์ ที่ความถี่ 29 เมกกะเฮริท

ในกรณีที่มีค่าความเหนี่ยวนำทั้งหมดค่าเดียวกัน แต่ตัวเก็บประจุมีค่ามากขึ้น จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ในจุดที่ความถี่ต่ำลง ในอีกกรณีหนึ่งถ้าตัวเก็บประจุมีค่าเล็กเกินไปก็จะทำให้มันเก็บประจุได้ไม่พอเพียงที่จะจ่ายให้กับกระแสทรานเซียนท์ที่ไอซีแต่ละตัวต้องการโดยไม่ทำให้เกิดการหยุดของแรงดัน ดังนั้นในการใช้งานควรเลือกตัวเก็บประจุให้มีค่าที่เหมาะสมกับงานนั้นๆ

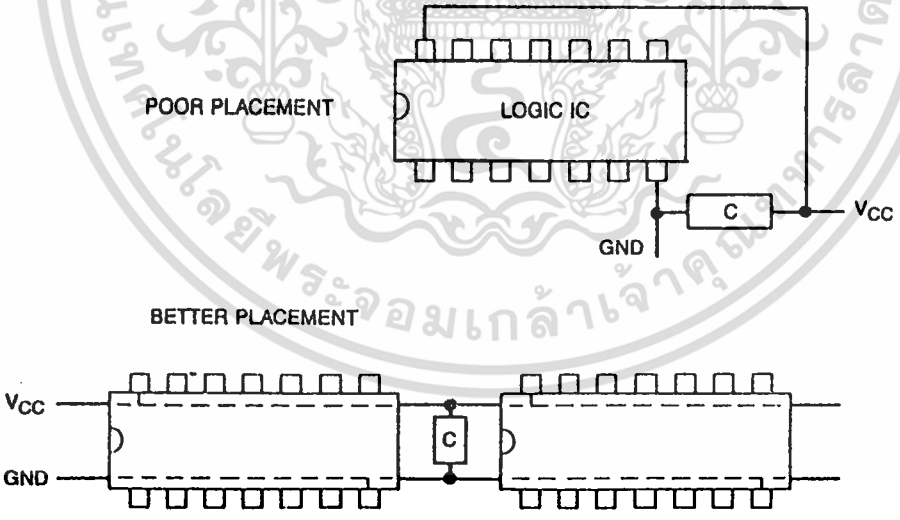
ในการทดลองหลายๆ ครั้งกับไอซี 14 และ 16 ขา เพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะที่จุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแรงดันน้อยที่สุด ควรจะมีค่าประมาณ 470-1000 พิโคฟารัด ซึ่งในการหาค่าตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งที่เหมาะสมในแต่ละงาน สามารถหาได้โดยทำการวัดสัญญาณรบกวนแรงดัน ของไอซีแต่ละตัวโดยทำการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุไปเรื่อยๆ แล้วพิจารณาว่าค่าใดให้สัญญาณรบกวนแรงดันน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานตัวเก็บประจุควรเลือกให้มีค่าความจุขนาดเล็กที่สุดที่จะทำให้เป็นผลดีกับงาน ซึ่งไม่ควรใช้ค่าที่มากเกินกว่า 0.01 ไมโครฟารัด ยกเว้นเสียแต่ในกรณีของแรม (Random Access Memory, RAM) จะต้องการกระแสมากในช่วงของรีเฟรชไซเคิล (refresh cycle) เมื่อเทียบการทำงานกับลอจิก ไอซีจะมีการ สวิทช์โดยทั่วไปประมาณ 50เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมดที่ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง จะต้องจ่ายกระแสให้กับเกท อย่างเพียงพอ แต่ในของไดนามิกแรม (Dynamic RAM, DRAM) แล้ว ทุกๆเซล จะมีการรีเฟรชพร้อมกันหมด ซึ่งจำนวนของเซลในแรม จะมากกว่าจำนวนเกทในไอซี โดยจะต้องจ่ายกระแสให้กับเซล ทั้งหมดพร้อมกันขณะรีเฟรชไซเคิล ดังนั้นตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง จะต้องมีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าใช้กับไดนามิกแรม โดยไดนามิกแรม ที่มีความจุประมาณ 250k จะต้องใช้ตัวเก็บประจุประมาณ 0.1ไมโครฟารัด ในการดีคัปปลิ้ง

การวางตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง

ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง จะต้องวางให้ชิดกับไอซีมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถ้าไอซี มีการวางตัวเป็นแถวดังรูปที่ 2.5-7 สามารถใช้ตัวเก็บตัวเดียวกันในการดีคัปปลิ้ง ไอซี 2 ตัวได้ อย่างไรก็ตามจะต้องมีการต่อตัวเก็บประจุระหว่างไฟเลี้ยงและกราวด์ของไอซีแต่ละตัว ซึ่งถ้าไอซีตัวนั้นมีขาไฟเลี้ยงและกราวด์อยู่ในแนวทะแยงมุมจะทำให้ต่อตัวเก็บประจุกำจัดสัญญาณรบกวนได้ลำบาก ซึ่งขาไฟเลี้ยงและกราวด์ของอุปกรณ์ควรอยู่ใกล้ๆ กันหรืออยู่ตรงข้ามกันด้านใดด้านหนึ่ง



รูปที่ 2.5-7 การวางตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง

เมื่อทำการต่อตัวเก็บประจุแล้ว สิ่งสุดท้ายที่สำคัญ คือต้องทำการลดค่าความเหนี่ยวนำระหว่างไอซีและตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งซึ่งเกิดจาก

1.ค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดจากตัวเก็บประจุเอง

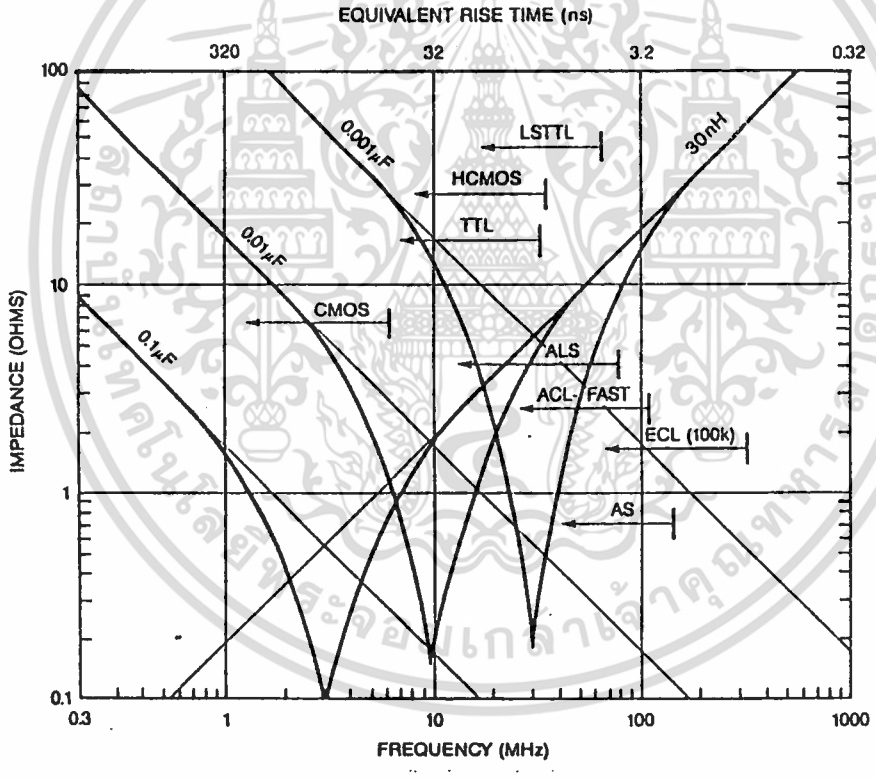
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเชื่อมระหว่างตัวเก็บประจุกับไอซี

3.ความเหนี่ยวนำของตัวนำที่อยู่ในตัวไอซี

ถ้าทำการเลือกชนิดของตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมค่าความเหนี่ยวนำในตัวเก็บประจุจะตัวทิ้งได้ เมื่อเทียบกับค่าที่เกิดจาก 2 องค์ประกอบที่เหลือ ความเหนี่ยวนำของสายในตัวไอซี ขนาด 14 หรือ 16 ขา จะมีค่าประมาณ 10-15 นาโนเฮนรี่ เหลือเพียงค่าความเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อในบอร์ด เป็นพารามิเตอร์ ที่นักออกแบบทำการควบคุมได้

ลายวงจรบนบอร์ดควรจะทำให้มีขนาดสั้นที่สุด และวางลายของตัวนำให้ใกล้กันมากที่สุด เพื่อลดพื้นที่ของลูป โดยค่าความยาวรวมของตัวนำทั้งสองตัว (สายไฟเลี้ยง และสายกราวด์) ควรจะมีค่าน้อยกว่า 1.5 นิ้ว ซึ่งจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำปกติลดลงจนอยู่ในช่วง 25-30 นาโนเฮนรี่



รูปที่ 2.5-8 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของการต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้ง

รูปที่ 2.5-8 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของการต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งหลายๆ ค่า ที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของลายวงจร 30 นาโนเฮนรี่ พร้อมกับแสดงช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการดีคัปปลิ้ง กับไอซี แต่ละตระกูล โดยช่วงความถี่จะอยู่ในช่วง 1/Tr แล้วลดต่ำลงมาจนถึงความถี่พื้นฐานของคล็อค ถ้าความถี่อยู่นอกเหนือความถี่ช่วงนี้จะทำให้มีอิมพีแดนซ์อยู่ประมาณ 5-10 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดีคัปปลิ้งด้วยวิธีอื่น

ไอซีที่มีขนาดใหญ่ (24 ถึง 40ขา) จะหาตัวเก็บประจุที่มีค่าใหญ่พอในการดีคัปปลิ้ง ได้อย่างลำบาก ดังนั้นจึงมีวิธีอื่นนอกเหนือจากการใช้ตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งมาตรฐาน โดยวิธีการอื่นที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ ตัวอย่างเช่น

1. ใช้ไอซีที่มีโครงสร้างของรูปทรงเปลี่ยนไป (เช่น ใช้ไอซี ที่ไม่ใช้สายนำพาหะ)
2. ใช้วิธีต่อตัวเก็บประจุหลายๆ ตัวกระจายให้ได้เท่ากับค่าที่เหมาะสมในการดีคัปปลิ้ง
3. ใช้ซอคเก็ต (socket) ที่มีตัวเก็บประจุภายใน
4. ใช้บอร์ดที่มีตัวเก็บประจุแบบติดกับพื้นผิวเลย (surface mounted)
5. ใช้ตัวเก็บประจุใส่เข้าไป ในตัวไอซีเลย

โดยวิธีการเปลี่ยนตัวไอซี ที่ไม่ใช้สายในการนำพาหะ หรือใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปในตัวมันเองเลย จะช่วยลดค่าเหนี่ยวนำจาก 10-15 นาโนเฮนรี่ ได้เป็น 4 นาโนเฮนรี่ ถ้าใช้วิธีใส่ตัวเก็บประจุบนบอร์ด จะทำให้ตัวเก็บประจุอยู่ใกล้กับชิพมากขึ้นเพราะไอซี ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้วิธีนี้จะมีค่าได้ใกล้เคียงกับวิธีการข้างต้น

หรือใช้วิธีที่ใช้ตัวเก็บประจุหลายๆ ตัวต่อให้ได้ค่าใกล้กับค่าที่เหมาะสม โดยจะต้องมีการต่อสายส่งแบบบาร์ (bus bars) ซึ่งจะมีผลดีมาก เพราะมีการกระจายค่าความจุ และช่วยกำจัดค่าความเหนี่ยวนำ ภายในเป็นวิธีการที่ดีที่จะใช้กับไอซีที่มีขนาดใหญ่ และใช้วิธีการดีคัปปลิ้ง ด้วยวิธีการอื่นได้ยาก

บริษัททำไอซีซ็อคเก็ตส่วนใหญ่จะทำตัวเก็บประจุ ติดมากับซ็อตเก็ตด้วย โดยตัวเก็บประจุ จะต้องมีค่าเหมาะสมในการดีคัปปลิ้ง ซึ่งช่วยแก้ไขปัญหาที่ตัวไอซีมีขาแหล่งจ่ายไฟ และกราวด์ ทะแยงมุมกันได้

การใช้พื้นผิวของตัวเก็บประจุ วางบนข้างใดข้างหนึ่งของบอร์ดที่ไม่ได้ทำการวางอุปกรณ์ สามารถต่อทะแยงมุมขาแหล่งจ่ายไฟกับกราวด์ได้ ซึ่งจะให้ผลเหมือนกับการใช้ซ็อคเก็ต แก้ไขเพียงแต่ว่ามันไม่ต้องใช้ซ็อคเก็ต จะช่วยลดความเหนี่ยวนำได้อย่างมาก กินพื้นที่บนบอร์ดน้อย และเพิ่มความหนาแน่นในการวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรได้

ถ้าการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุดีคัปปลิ้งมาตรฐานเป็นวิธีที่ให้ค่าเป็นที่น่าพอใจแล้ว จะเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากมีราคาไม่แพง และเป็นการใช้งานแพร่หลายมากกว่าวิธีอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการออกแบบวงจร

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าปัญหาในการเก็บสัญญาณความถี่สูงทำได้ลำบาก เนื่องจากจะต้องมีการออกแบบวงจรและเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการทำงาน โครงงานนี้มีข้อดีอยู่ที่ใช้อุปกรณ์ที่ทำงานความถี่สูงไม่มากนัก ได้แก่หน่วยความจำ (memory) และตัวนับ (counter) เพื่อกำเนิดสัญญาณ โดยจะมีหน้าที่การทำงานเป็นดังภาพที่ 3-1

ในการทำงานจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม และรับคำสั่งมาจากคอมพิวเตอร์ จะแบ่งสภาวะข้อการเก็บข้อมูลได้ 2 ช่วงการทำงาน โดยเทียบการทำงานกับหน่วยความจำ

1. ขั้นตอนแรก การเก็บสัญญาณเข้าสู่หน่วยความจำ จะทำได้โดยการให้ตัวกำเนิดความถี่แบบโปรแกรมได้ (Programmable Oscillator) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณแอดเดรสสูงผ่านมัลติเพลกเซอร์(MUX) ได้ และตั้งสัญญาณควบคุมหน่วยความจำให้อยู่ในสถานะเขียนข้อมูล ($\overline{WR}$= 0, $\overline{OE}$ = 1) ในสถานะนี้หน่วยความจำจะทำงานโดยมีตัวนับเป็นตัวกำเนิดแอดเดรสในแต่ละหน่วยความจำ พร้อมกับบันทึกข้อมูลที่ได้จากตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลไปพร้อมกัน เมื่อบันทึกข้อมูลจนเต็มแล้วเกิดการโอเวอร์โฟลว์ (Over flow) จากตัวนับจะมีค่าเป็น 1 ซึ่งจะเป็นตัวเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในขั้นตอนที่สองต่อไป

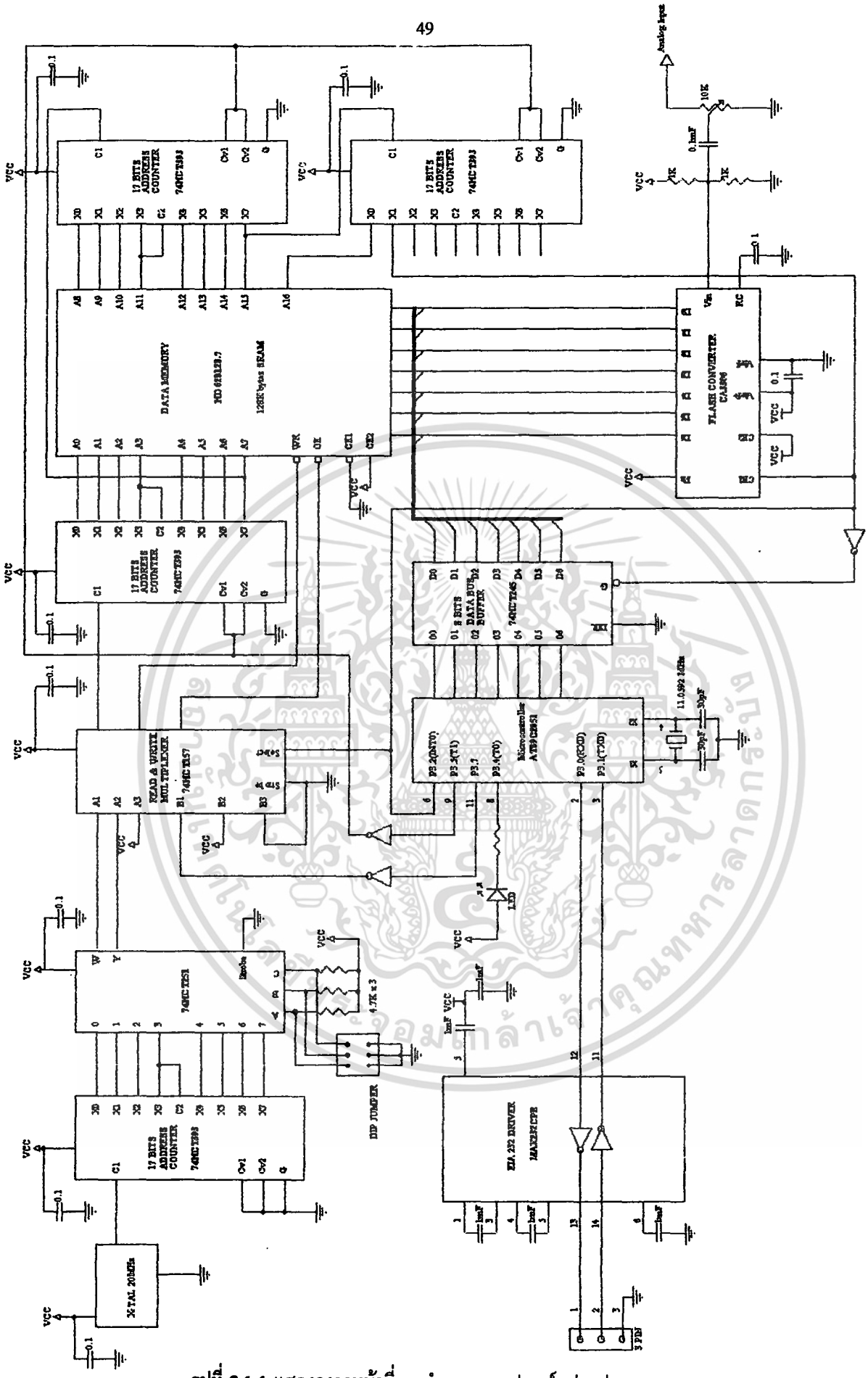
2. ขั้นตอนที่สอง จะเป็นการดึงสัญญาณออกจากหน่วยความจำส่งผ่านขึ้นมาบนคอมพิวเตอร์ ผ่านพอร์ตอนุกรมมาตรฐาน (RS-232) โดยการเปลี่ยนตัวกำเนิดสัญญาณแอดเดรสมาเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์และสัญญาณควบคุมหน่วยความจำให้อยู่ในสภาวะอ่านข้อมูล ($\overline{WR}$ = 1, $\overline{OE}$ = 0) ข้อมูลที่ปรากฏในส่วนระบบสายส่งข้อมูล (data bus) จะเป็นข้อมูลที่บันทึกอยู่ในหน่วยความจำในตำแหน่งต่างๆภายในหน่วยความจำ โดยจะทำการเปลี่ยนค่าแอดเดรสไปเรื่อยๆ พร้อมกับทำการส่งข้อมูลขึ้นมายังคอมพิวเตอร์ไปพร้อมกัน

3.1 วงจรในแต่ละส่วน

1. ตัวกำเนิดความถี่แบบโปรแกรมได้ จะเป็นส่วนที่เราสามารถเลือกความถี่ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณการสั่นได้ตามอัตราการแซมปลิ้ง ข้อมูลของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล ซึ่งอัตราการแซมปลิ้งสูงสุดได้ 10 เมกกะเฮิรทซ์ สามารถดูภาพประกอบจากรูป 3.1-1

เมื่อผ่านตัวนับ ซึ่งแต่ละบิตก็คือทอกเกิลฟิปฟลอป (Toggle fipflop) ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นคล็อคจึงถูกหารสองลงไปทำให้อัตราการเกิดสัญญาณความถี่สูงสุดเป็น 10 เมกะเฮิรทซ์ และถูกหาร 2 ลงไป ตามลำดับ โดยเราสามารถเลือกอัตราการแซมปลิ้ง ได้ 8 ความถี่ โดยการตั้งตัวเลือก (DIP jumper) เลือกความถี่ที่จะออกมาที่ขา W และ Y ดังตารางที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1-1 แสดงวงจรหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเซทจัมพ์เปอร์	อัตราการแซมปลิ้ง (MHz)
000	10
001	5
010	2.5
011	1.25
100	0.625
101	0.3125
110	0.15625
000	0.078125

ตารางที่ 5 การเซ็ตจัมป์เปอร์ให้เหมาะสมกับอัตราการแซมปลิ้ง

2. มัลติเพล็กเซอร์ เป็นส่วนกำเนิดสัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูล โดยจะจับคู่กับสัญญาณเขียนอ่านดังนี้ โดยสามารถดูภาพประกอบจากรูปที่ 3.1-1

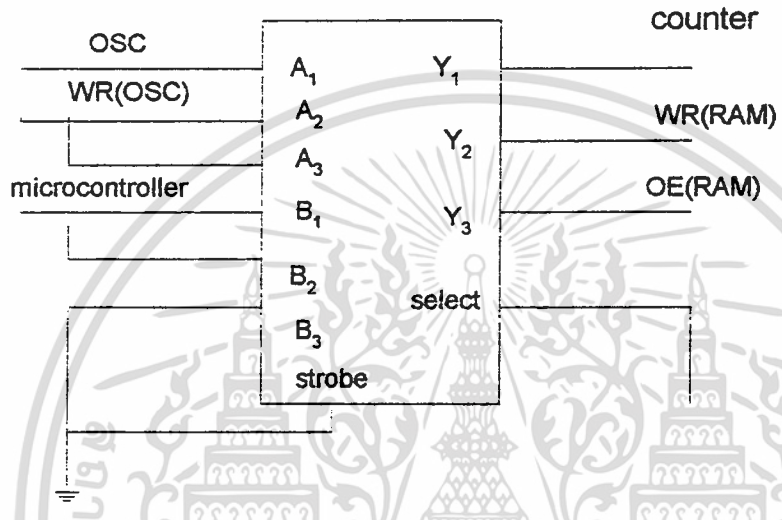
ถ้าขาเซเลคท์ (select) ถูกเลือกให้เป็น 0 จะทำให้ช่องสัญญาณ A ถูกส่งผ่านไปยังเอาท์พุท คือส่วนของการเขียนข้อมูล โดยสัญญาณการเขียนข้อมูลจะใช้สัญญาณ Y ซึ่งจะได้จากตัวกำเนิดสัญญาณ โดยจะมีรูปสัญญาณกลับกันกับ แต่มีความถี่เท่ากัน และต่อ ให้เป็น 1 ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเขียนอย่างเดียว เมื่อเกิดการโอเวอร์โฟลว์ ขาเซเลคท์จะเท่ากับ 1 จะทำให้ช่องสัญญาณ B ต่อกับเอาท์พุท ดังนั้นการกำเนิดแอดเดรส จึงจะต้องมีการให้กำเนิดพัลส์ 1 ลูก ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ขณะที่สัญญาณควบคุม $\overline{WR}$ = 1 และ $\overline{OE}$ =0 จะเป็นการอ่านข้อมูลจากแรม เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วทำการสั่งพอร์ทอนุกรม (serial port) ต่อไป

3. ตัวนับที่มี 17 บิต เป็นส่วนนับสัญญาณพัลส์ ที่เข้ามาแล้วทำให้ค่าแอดเดรสที่ให้กับหน่วยความจำมีการเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ค่า ขึ้นอยู่กับว่าขา C_1 จะต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดคล็อค ในขั้นตอนใด แต่อย่างไรก็ตามจะมีสถาวะที่เหมือนกันคือ จะต้องทำการนับจาก 0000 เพิ่มขึ้นไปจนถึง FFFF
(ดูภาพประกอบจากรูป 3.1-2)

4. ขั้นตอนในการออกแบบ สัญญาณควบคุม จะเห็นว่าในสภาวะที่ทำการอ่าน หรือเขียนข้อมูลนั้น การกำหนดให้ไอซีตัวใดทำงานและตัวใดไม่ทำงานนั้น จะมีผลอย่างมากเนื่องจากมีการต่อสายส่งข้อมูลร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

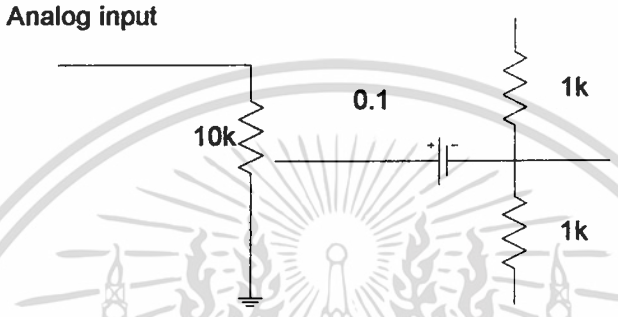
จะต้องมีการกำหนดได้อย่างเหมาะสม โดยในสัญญาณควบคุมจะใช้เป็น OE เข้ามาเป็นตัวเลือกที่ขา CE ของไอซีแต่ละตัว



รูปที่ 3.1-2 แสดงรูปตัวเคาท์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ส่วนตัวปรับสัญญาณ (Signal Condition) จะใช้เป็นตัวลดทอนสัญญาณไฟกระแสสลับ (attenuator) สำหรับสัญญาณอนาลอกที่มีค่าสูง เพื่อเป็นตัวลดสัญญาณโดยใช้หลักการจากโวล์ทเตจดิไวเดอร์ (voltage divider)



รูปที่ 3.1-3 แสดงหลักการใช้โวลท์เตจดีไวด์เดอร์

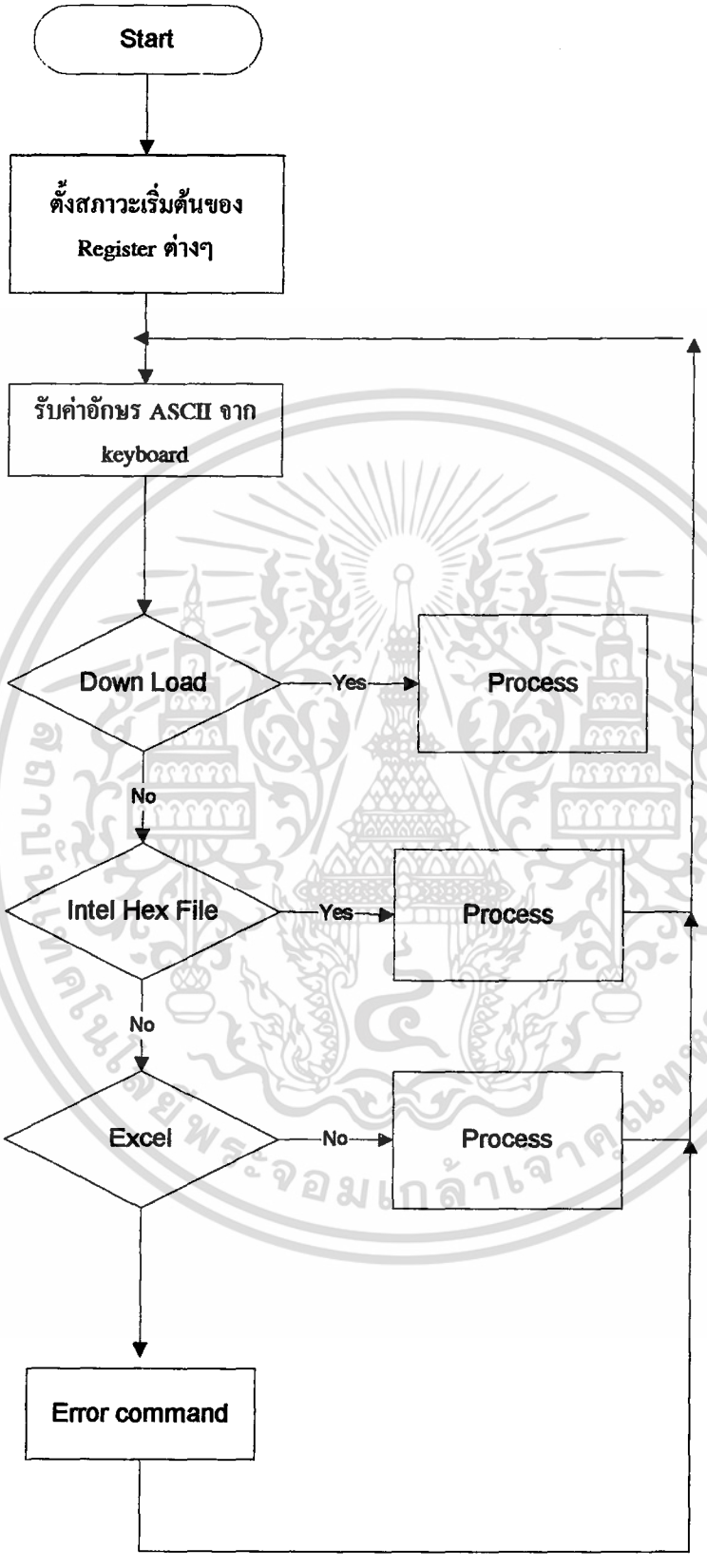
6. การออกแบบตัวควบคุมซอฟท์แวร์

ออกแบบให้เป็นระบบควบคุม โดยรับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าแอสคิ (ASCII) ที่รับมามีค่าเป็น D จะการเก็บข้อมูลไว้แล้วดาวด์โหลดข้อมูลจากแรมขนาด 16 ×816 จำนวน 10 เทกซ์บอกซ์ โดยในแต่ละเทกซ์บอกซ์ จะต้องมีการส่งสเปซบาร์เพื่อบอกการส่งข้อมูล (ดูภาพประกอบจาก 3.1-4)

ถ้ามีค่าที่รับเข้ามาเป็น I จะทำการเก็บข้อมูล แล้วทำการส่งข้อมูล โดยการเข้ารหัสให้เป็นอินเทลเฮกซ์ไฟล์ (Intel Hex file) ต่อเนื่องกันไปจนหมด 128k ไบท์

การพลอตในเอกซ์เซล เป็นการเก็บข้อมูลแล้วทำการส่งข้อมูลกลับมาเป็นรูปลำดับข้อมูล พร้อมกับค่าข้อมูลที่ได้ เพื่อที่จะนำไปพล็อตในไมโครซอฟท์เอกซ์เซล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1-4 หลักการออกแบบตัวควบคุมซอฟท์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 คุณสมบัติของตัวอุปกรณ์

จะมีค่าอินพุทอิมพิแดนซ์ 10 กิโลไบท์ มีอินพุทที่มีการสวิงสูงสุด 5โวลท์ p-p (peak-to-peak) อัตราการส่งข้อมูล 9600 bps

ช่วงเวลาในการแซมปลิ้ง = เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่ง X จำนวนตำแหน่ง

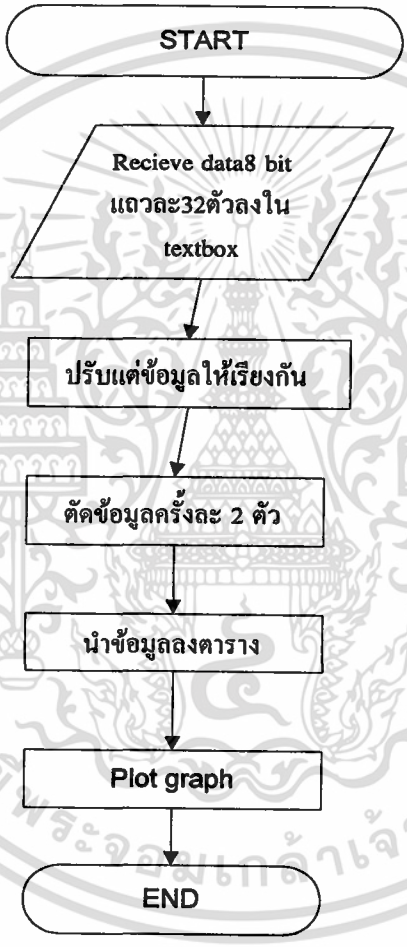
อัตราการแซมปลิ้ง (MHz)	ช่วงเวลาสูงสุดในการเก็บข้อมูล (วินาที)
10	0.013
5	0.02
2.5	0.05
1.25	0.10
0.625	0.20
0.3125	0.41
0.15625	0.83
0.078125	1.67

ตารางที่ 6 แสดงช่วงเวลาสูงสุดในการแซมปลิ้งเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทำงานในส่วนซอฟท์แวร์

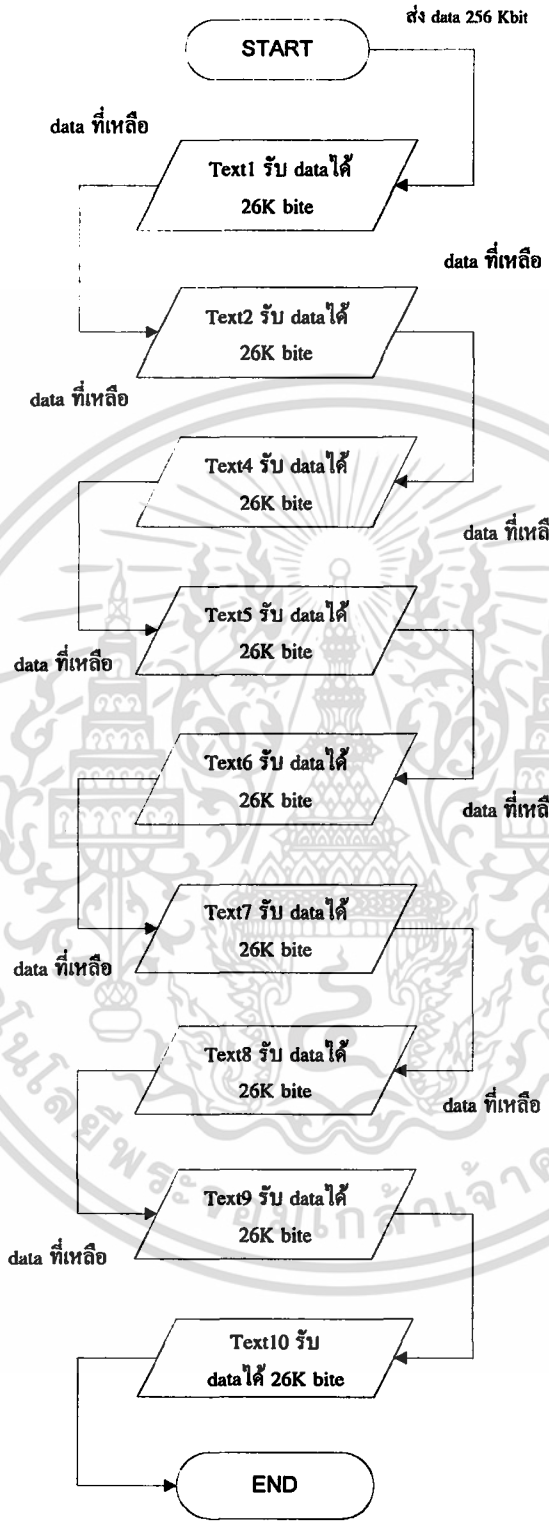
ลักษณะการทำงานของซอฟท์แวร์จะสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูป



รูปที่ 3.3-1 การทำงานในส่วนซอฟท์แวร์

ในส่วนของการทำงานของซอฟท์แวร์ของโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียน ที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิค ซึ่งเป็นภาษาชั้นสูงเพื่อใช้ในการสร้างกราฟฟิคเพื่ออินเตอร์เฟดกับผู้ใช้โดยตรงหรือที่เรียกว่า **GUI** (Graphic User Interface) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะแบ่งขั้นตอนการทำงานหลัก ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3-2 ขั้นตอนการทำงานหลักๆ ของส่วนซอฟแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 จะมีการส่งโค๊ดออกไปให้กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียน หลังจากเครื่องได้ทำการรับข้อมูลทรานเซียนของอุปกรณ์ที่ทำการตรวจจับ เมื่อเครื่องวิเคราะห์ทรานเซียนได้รับรู้ถึงโค๊ดที่ถูกส่งมาก็จะส่งข้อมูลสัญญาณทรานเซียน เป็นข้อมูลขนาด 8 บิตให้กับโปรแกรมซึ่งรอรับข้อมูลอยู่ โดยจะรับข้อมูลลงมาที่เท็กซ์บอซ์ก แต่เนื่องจากค่าวงจรที่ใช้มีอัตราในการแซมปิ้ง(Sampling) สูงมาก ทำให้ข้อมูลที่รับเข้ามามีจำนวนมากถึง 256k ไบต์แต่ละเท็กซ์บอซ์ก สามารถรับข้อมูลได้เพียง 25k ไบต์ เท่านั้น ทำให้เราจำเป็นจะต้องใช้เท็กซ์บอซ์กสำหรับการรับข้อมูลทั้งหมดถึง 10 เท็กซ์บอซ์ก

โดยแต่ละข้อมูลที่ต้องการจะมี 2 ไบต์ เพราะฉะนั้นข้อมูลทั้งหมดที่วงจรส่งมาคือ 128k ข้อมูล เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนจะส่งข้อมูลมาเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 25k ไบต์เพื่อให้แต่ละเท็กซ์บอซ์กสามารถรับได้ เมื่อครบทั้ง 10 เท็กซ์บอซ์ก โดยการเก็บข้อมูลลงในแต่ละเท็กซ์บอซ์กจะเรียงข้อมูลไปเป็นบรรทัด ๆ จนกระทั่งข้อมูลครบ 25 กิโลไบต์ ซึ่งแถวแรกจะเป็นตัวโค๊ดที่ส่งออกไปให้สู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียน

ขั้นตอนที่ 2 โปรแกรมจะนำข้อมูลที่อยู่ในเท็กซ์บอซ์กแต่ละเท็กซ์ไปทำการปรับแต่ง โดยจะตัดบรรทัดที่ไม่ใช้ข้อมูลออกไป ให้เหลือเพียงสิ่งที่เป็นข้อมูลล้วน ๆ

ขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมจะทำการแบ่งข้อมูลซึ่งถูกปรับแต่งมาจากในขั้นตอนที่ 2 ออกเป็นชุด ๆ ละ 2 ไบต์แล้วนำข้อมูลแต่ละชุดส่งไปเข้าตารางเรียงเป็นลำดับลงไป พร้อมทั้งยังเขียนเลขลำดับของข้อมูลลงในตารางด้วยเพื่อใช้ในการแสดงผลเป็นกราฟขั้นต่อไป ในการแบ่งข้อมูลจะทำการเริ่มแบ่งข้อมูลจากเท็กซ์บอซ์กที่ 1 จนเสร็จแล้วค่อย ๆ ไล่ไปทีละเท็กซ์จนถึงเท็กซ์ที่ 10

ขั้นตอนที่ 4 ขณะนี้ผู้ใช้จะเห็นข้อมูลของสัญญาณทรานเซียนทั้งหมด เรียงอยู่ในตารางแต่ละตารางเรียบร้อยแล้ว โดยเรียงตามลำดับของข้อมูล ผู้ใช้สามารถที่จะเลื่อนดูข้อมูลทั้งหมดได้โดยใช้สกอร์บาร์ด้านข้างของตาราง หรือหากต้องการดูข้อมูลเป็นกราฟก็ให้ผู้ใช้ทำการคลิ๊กที่ปุ่มทูลบาร์ของกราฟ หรือเลือกเมนูกราฟ โปรแกรมก็จะเข้าสู่ฟอร์มกราฟ

ขั้นตอนที่ 5 ในส่วนของกราฟผู้ใช้สามารถดูข้อมูลแต่ละข้อมูลเรียงตามลำดับไปทีละช่วง เช่นอาจจะเป็นการเลือกช่วงละ 10 ข้อมูล หรือสามารถที่จะเปลี่ยนลักษณะของกราฟเพื่อใช้ในการดูข้อมูลที่เปลี่ยนไป เช่น กราฟวงกลม , กราฟแท่ง 2 มิติ , กราฟแท่ง 3 มิติ , กราฟเส้น เป็นต้น หรือหากต้องการนำข้อมูลไปใช้เพื่อเป็นหลักฐานหรือไปใช้งานในสถานที่อื่น สามารถที่จะพิมพ์ข้อมูลของกราฟออกมาทางเครื่องพิมพ์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนข้างต้นจะมีเทคนิคและรายละเอียดในการเขียนโปรแกรมในจุดใหญ่ๆ และจุดย่อยๆ ในแต่ละส่วนของโปรแกรมดังนี้

1. ในส่วนของการรับข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียน

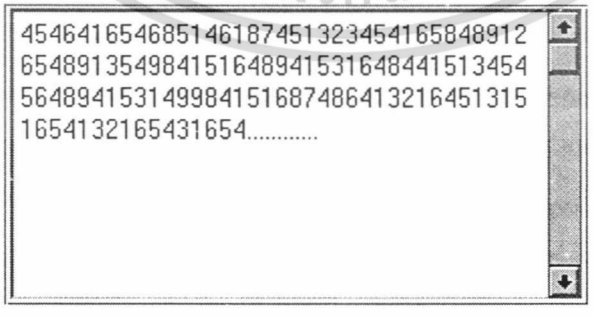
เริ่มต้นด้วย เมื่อทำการคลิ๊กไอคอนของโปรแกรมและเข้าสู่โปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้จะต้องเลือกพอร์ตอนุกรมที่จะใช้ในการติดต่อกับตัวเครื่องมือโดยมีให้เลือกอยู่ 2 พอร์ตคือ คอมม์ 1 และ คอมม์ 2 ซึ่งมีจะวิธีการเลือก ก็คือ

1.1 หากว่าในการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้มีการใช้เมาส์อยู่ที่พอร์ตคอมม์ 1 ก็ให้เลือกพอร์ตคอมม์ 2

1.2 ในทางกลับกันหากเมาส์ต่ออยู่ที่พอร์ตคอมม์ 2 ก็ให้เลือกใช้พอร์ตคอมม์ 1 ในการติดต่อกับเครื่องมือ

* ในการเลือกพอร์ตจะเลือกผิดไม่ได้เนื่องจากมีผลต่อการใช้เมาส์ดังนั้นต้องระมัดระวังในการเลือก

เมื่อทำการเลือกพอร์ตที่จะใช้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้วโปรแกรมจะเข้าสู่อีกหน้าจอหนึ่ง โดยจะมีการตั้งความถี่ในการรับข้อมูลให้อัตโนมัติ (Baud Rate) คือมีค่าเท่ากับ 9600 เมื่อเข้าสู่หน้าจอซึ่งใช้ในการรับข้อมูล ผู้ใช้จะพบเห็นตารางทั้งหมด 10 ตาราง , เท็กซ์บอซ์กอีก 10 เท็กซ์บอซ์ก , ปุ่มสำหรับการดาว์นโหลด และปุ่มยกเลิก ในการรับข้อมูลเมื่อผู้ใช้คลิ๊กปุ่มดาว์นโหลด โปรแกรมจะทำการส่งค่าโค๊ดคำสั่งที่ใช้ในการติดต่อกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนออกไปและรอรับข้อมูล โดยมีการรับไปเรื่อยๆ ณ จุดนี้ เมื่อเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนรับค่าโค๊ดไปและถูกต้องก็จะทำการส่งค่าของข้อมูลสัญญาณทรานเซียนให้กับโปรแกรมโดยส่งผ่านทางพอร์ตอนุกรมที่เลือกไปข้างต้น จะต้องมีการส่งเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 25 กิโลไบต์เนื่องจากสาเหตุข้างต้นในเทคนิคการส่งข้อมูล จะต้องทำการส่งข้อมูลมาเป็นบรรทัด ๆ ดังนั้นในการส่งกำหนดว่าจะต้องส่งข้อมูลมาบรรทัดละ 24 ไบต์จึงต้องมีการส่งมา 25 ไบต์แล้วส่งไบต์ต่อไปตามด้วยแคเรี่ย และ ลายน์ฟีด คือ คาแรกเตอร์ 13 และ 10 จะทำให้มีการขึ้นบรรทัดใหม่ ดังภาพ



เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณทรานเซียนส่งข้อมูลครบ 25 กิโลไบต์แล้วเครื่องจะทำการส่งค่าโค๊ดที่ใช้ในการบอกให้รู้ว่าครบ 25 กิโลไบต์คือ (:) หลังจากโปรแกรมรอรับข้อมูลขึ้นเท็กซ์บอซ์กอยู่เมื่อได้รับรู้โค๊ด ก็

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำการออกจากการรับข้อมูลแล้วจะส่งโค๊ดออกไปให้กับเครื่องมือรู้ให้ส่งค่าข้อมูลช่วงที่ 2 มา เป็นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทั้ง 256 กิโลไบต์ เมื่อข้อมูลครบทั้ง 256 กิโลไบต์ ก็จะส่งให้ส่วนปรับแต่งข้อมูลจัดการ

2. ในส่วนการปรับแต่งข้อมูล

เมื่อรับข้อมูลมาจากเท็กซ์บอซ์กทั้ง 10 เท็กซ์บอซ์ก ซึ่งขณะนี้ข้อมูลจะมีการผสมผสานระหว่างโค๊ดที่ส่งออกไปเพื่อเลือกช่วงของข้อมูล , ข้อมูล , คาเร็กเตอร์ 13(CR) ,คาเร็กเตอร์ 10(LF) และโค๊ดที่ใช้ในการหยุดข้อมูล โปรแกรมจะทำการตัดข้อมูลครั้งแรกโดยอาศัยการดูจากความยาวของข้อมูลในแต่ละบรรทัด หากบรรทัดไหนยาวน้อยกว่า 20 ไบต์ก็จะถูกตัดออกไป (ปรกติข้อมูลที่รับเข้ามามีความยาวบรรทัดละ 24 ไบต์ เลือกช่วงตรงกลางเพื่อกันความผิดพลาด) ขณะนี้ข้อมูลจะอยู่ในลักษณะเป็นบรรทัด ๆ ละ 24 ไบต์ในเท็กซ์บอซ์ก โดยไม่มีโค๊ดอื่น ๆ ปนยกเว้นโค๊ดที่เอาไว้ในการหยุดเมื่อข้อมูลครบ 25 กิโลไบต์ และพร้อมที่จะเข้าสู่การแบ่งข้อมูลต่อไป

3. การแบ่งข้อมูล

ข้อมูลที่ได้รับมาจากหัวข้อที่ 3 ข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บอยู่ในเท็กซ์บอซ์ก วิธีการแบ่งข้อมูลก็คือจะแบ่งข้อมูลออกเป็นชุด ๆ ละ 2 ไบต์ ทำการตัดข้อมูลโดยใช้คำสั่ง

Mid (S,first,length)

โดย S คือ ข้อมูลที่จะทำการตัดแบ่ง ในที่นี้เลือกข้อมูลในเท็กซ์บอซ์ก

first คือ ตำแหน่งแรกของข้อมูลที่ใช้ในการตัดแบ่ง

length คือ ช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการตัดแบ่ง ในที่นี้เลือก 2 ไบต์

ในการตัดจะมีการตัดข้อมูลทีละ 2 ไบต์จนกว่าจะพบคาเร็กเตอร์ 13 และ 10 เมื่อพบก็จะทำการขึ้นบรรทัดใหม่เพื่อทำการตัดต่อไปทีละบรรทัดจนกระทั่งพบว่าบรรทัดไหนเป็นบรรทัดที่มีโค๊ดที่บอกว่าครบ 25 กิโลไบต์ โปรแกรมก็จะทำการเปลี่ยนเท็กซ์ที่ใช้ในการแบ่งข้อมูลไปจนกระทั่งครบทั้ง 10 เท็กซ์ ก็จะเสร็จสิ้นกระบวนการแบ่งข้อมูล

4. การแจกจ่ายข้อมูล

จากข้อมูลเป็นชุด ๆ ที่ได้จากการแบ่งในหัวข้อที่ 3 ก็จะส่งข้อมูลแต่ละชุดเข้าไปสู่ตาราง โดยในการจัดใส่นั้นจะต้องเลือกตาราง , บรรทัดและคอลัมน์ที่จะในการเก็บข้อมูล เช่นข้อมูลชุดที่ 1 เราจะเลือก ตารางที่ 1 คอลัมน์ที่ 2 และบรรทัดที่ 1 เพื่อทำการเก็บข้อมูล ส่วนในคอลัมป์แรกเราจะเอาไว้ใส่ตัวเลขลำดับที่ของข้อมูลเพื่อใช้ในการวาดกราฟ ในการแจกจ่ายข้อมูลจะทำร่วมไปกับการแบ่งข้อมูลเลย คือเมื่อมีการเปลี่ยนเท็กซ์บอซ์กของการแบ่งข้อมูล ก็จะมีการเปลี่ยนตารางของการแจกจ่ายข้อมูลด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

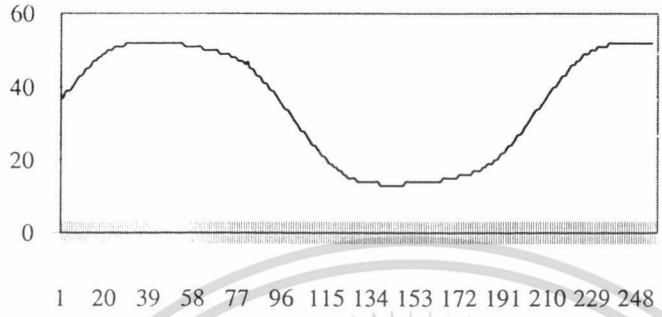
ผลการทดลอง

เราจะทำการทดสอบสัญญาณ โดยใช้อัตราการแซมปลิ้ง 10 เมกกะเฮิรทซ์ เป็นการเก็บสัญญาณรูปคลื่น 3 ชนิดได้แก่ คลื่นรูปซายน์ คลื่นรูปสามเหลี่ยม และคลื่นรูปสี่เหลี่ยม โดยไล่ลำดับความถี่ตั้งแต่ 50 กิโลเฮิรทซ์ เรื่อยมาจนถึง 2 เมกกะเฮิรทซ์ ตามลำดับ ดังนี้

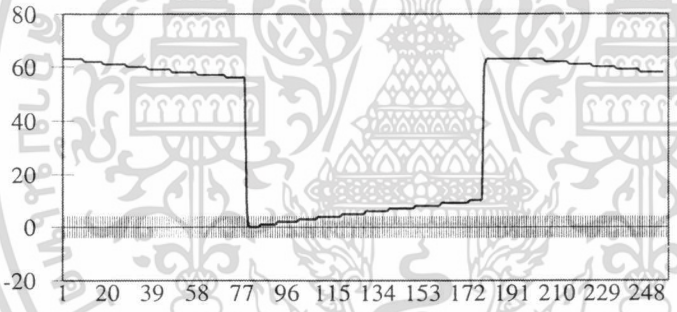
50 kHz
100 kHz
500 kHz
1 MHz
1.5 MHz
2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

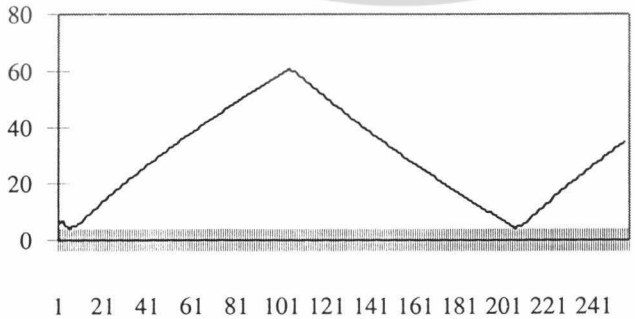
รูป sinewave ที่ความถี่ 50 kHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 50 kHz

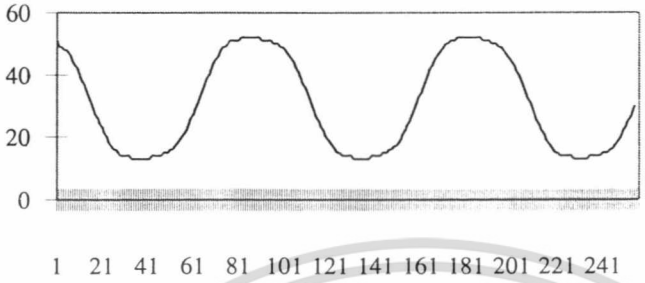


รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 50 kHz

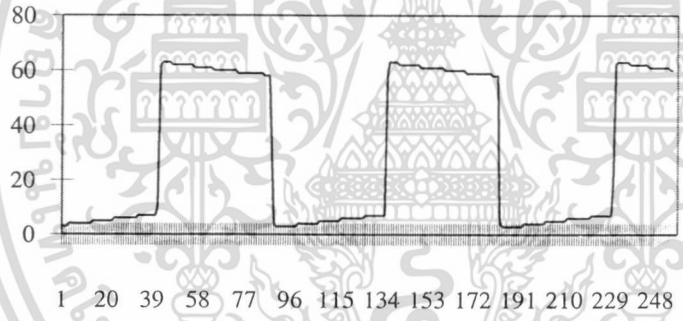


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

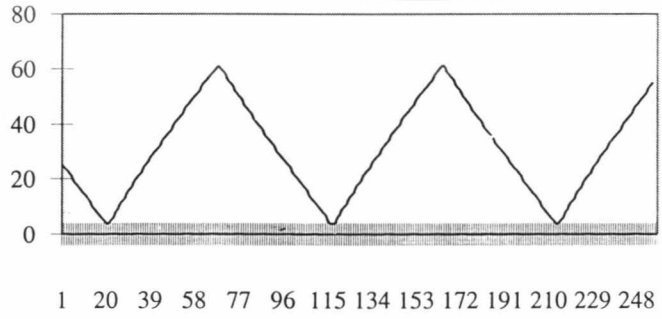
รูป sinewave ที่ความถี่ 100 kHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 100 kHz

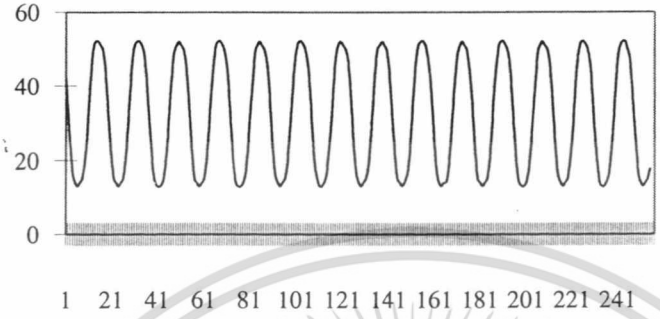


รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 100 kHz

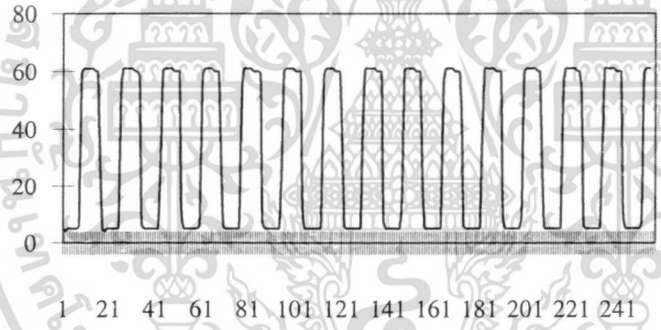


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

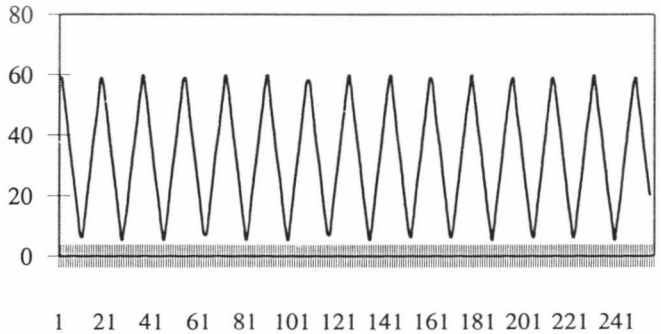
รูป sinewave ที่ความถี่ 500 kHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 500 kHz

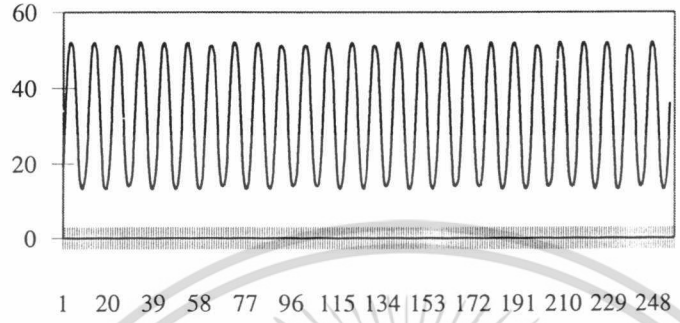


รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 500 kHz

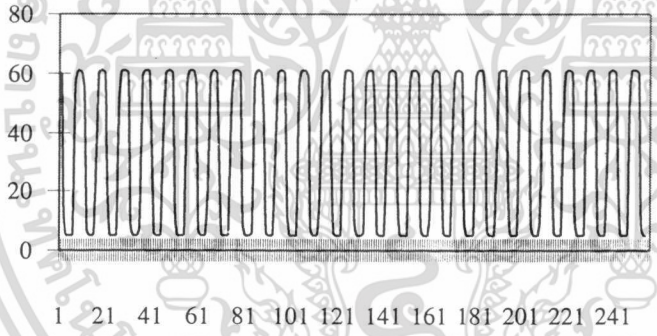


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

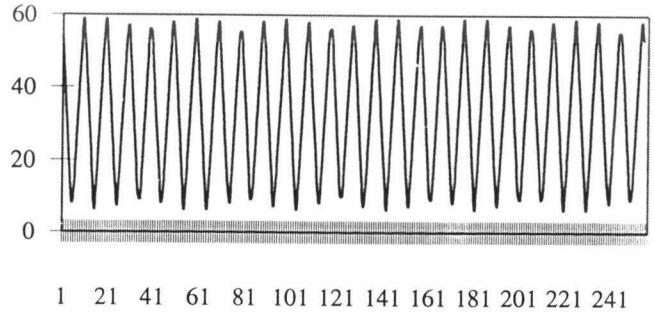
รูป sinewave ที่ความถี่ 1 MHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 1 MHz

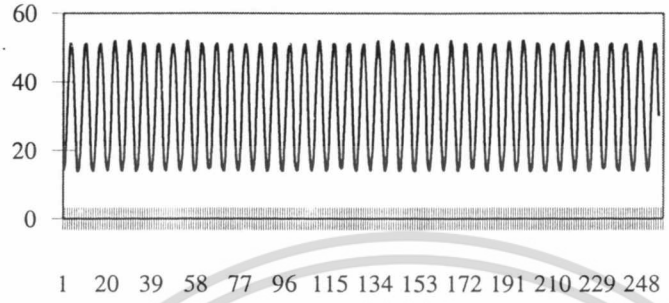


รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 1 MHz

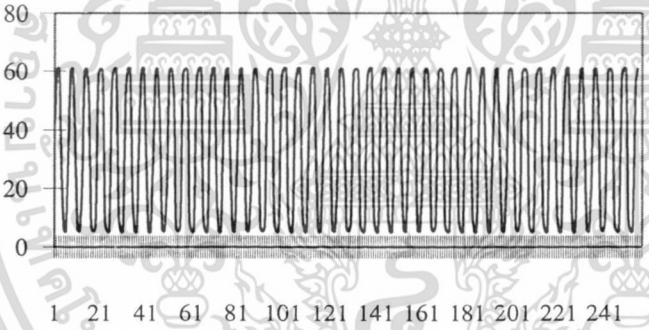


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

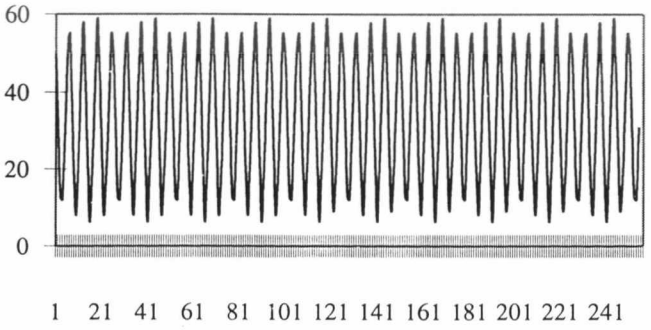
รูป sinewave ที่ความถี่ 1.5 MHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 1.5 MHz

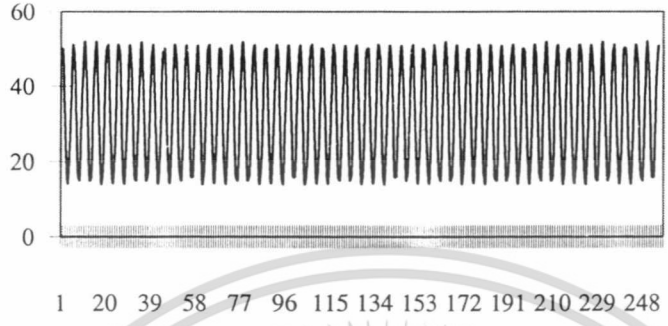


รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 1.5 MHz

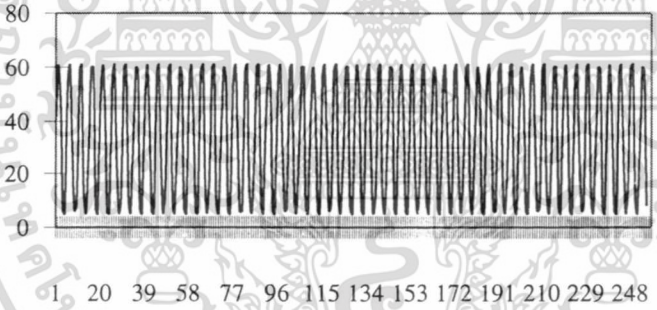


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

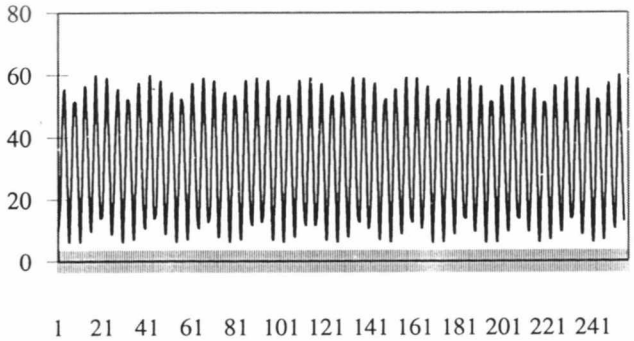
รูป sinewave ที่ความถี่ 2 MHz



รูป squarewave ที่ความถี่ 2 MHz



รูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่ความถี่ 2 MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลและวิจารณ์

โครงงานนี้สามารถเก็บสัญญาณได้ด้วยอัตราการแซมปลิ้ง สูงสุด 10 เมกกะเฮิรทซ์, บันทึกข้อมูลได้ขนาด 128k ไบท์ และมีความละเอียดขนาด 6 บิต ซึ่งสามารถที่จะทำการพัฒนาโดยการใช้ตัวแปลงสัญญาณที่มีอัตราการแซมปลิ้ง และความละเอียดที่สูงขึ้นได้ โดยระบบที่ออกแบบไว้สามารถรองรับได้สูงสุด 8 บิต เนื่องจากหน่วยความจำที่ใช้ มีความเร็วต่ำที่สุด ดังนั้นการที่จะเพิ่มอัตราการแซมปลิ้งให้สูงขึ้น จะต้องมีวิธีทำให้หน่วยความจำบันทึกได้เร็วขึ้น อาจจะใช้หน่วยความจำที่มีความเร็วสูงขึ้น หรืออาจจะทำให้การใช้หน่วยความจำ 2 ตัว สลับเขียน ซึ่งจะต้องออกแบบระบบสร้างสัญญาณแอดเดรสใหม่

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำ คือในสัญญาณความถี่ 10 เมกกะเฮิรทซ์ จะมีสไปซ์เกิดขึ้นรบกวนระบบการวัด ทำให้รูปสัญญาณที่ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดเนื่องจากมีความหนี่ยวนำจากระบบจ่ายไฟและระบบกราวด์ ดังนั้นจึงมีการแก้ไขได้ 2 วิธีคือ

1. ออกแบบระบบกราวด์ให้มีความเหนี่ยวนำต่ำ
2. ออกแบบระบบให้มีการลดการใช้กระแส

ซึ่งในโครงงานนี้ จะใช้วิธีที่ 2 เนื่องจากความถี่มีค่าไม่สูงนัก โดยเปลี่ยนไอซีที่ใช้อยู่เดิมจากตระกูล LS ให้เป็น HCT ซึ่งจะมีระดับลอจิกที่เหมือนกัน แต่จะลดการใช้ของกระแส ลงได้เท่าตัว ถึงแม้ว่า HCT จะมีความเร็วต่ำกว่า LS แต่ก็เพียงพอที่จะใช้งานในระดับ 10 เมกกะเฮิรทซ์

โครงงานนี้ยังไม่สมบูรณ์ในส่วนของวงจรปรับแต่งสัญญาณ (signal condition) เนื่องจากใช้เป็นตัวลดทอนสัญญาณกระแสสลับแบบ แบ่งแรงดัน (voltage divider) ซึ่งจะใช้ได้กับตัวกำเนิดสัญญาณที่จ่ายกระแสได้สูง และมีเอาท์พุทอิมพิแดนซ์ต่ำ เนื่องจากอินพุทอิมพิแดนซ์มีค่า 10 กิโลเฮิรทซ์ ดังนั้นเอาท์พุทอิมพิแดนซ์ ของสัญญาณจึงควรจะมีค่าต่ำกว่า 10 โอห์ม จึงจะไม่เกิดการดึงของกระแส และยังขาดส่วนทริกเกอร์ ซึ่งเป็นตัวที่จะใช้ในการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งในตอนนี้ใช้การแซมปลิ้งทันทีเมื่อมีคำสั่งจากคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. OTT,H.W. **NOISE REDUCTION TECHNIQUES IN ELECTRONIC SYSTEM,** 2nd ed., pp.274-321, JOHN WILEY & SONS, Inc., SINGAPORE,1989.

2. FEUCHT,D.L. **HANDBOOK OF ANALOG CIRCUIT DESIGN,** pp.659-660, ACADEMIC PRESS,Inc., USA,1990.

3. MINER,G.F. and COMER,D.J. **PHYSICAL DATA ACQUISITION FOR DIGITAL PROCESSING,** pp.319-330,367-370, PRENTICE-HALL,Inc., NEW JERSEY, 1992.

4. กลุ่มCNS **ออปแอมป์,** pp.1-11,118-121, หจก.สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพมหานคร.

5. PEI AN **HIGH-SPEED ANALOGUE CAPTURE,** ELECTRONICS WORLD, vol.103, no.1729, january, 1997.

6.LOUZON P. **USING HARRIS HIGH SPEED A/D CONVERTERS,** APPLICATION NOTE HARRIS DATA ACQUISITION, no.AN9214.2, october,1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Ann1
   BackColor      =  &H00C0C0C0&
   Caption        =  "Transient Signal Digitizer"
   ClientHeight   =  8310
   ClientLeft     =  270
   ClientTop      =  615
   ClientWidth    =  11700
   ForeColor      =  &H00000000&
   Height         =  9000
   Icon           =  "ANN1.frx":0000
   Left           =  210
   LinkTopic      =  "Form2"
   LockControls   =  -1  'True
   ScaleHeight    =  8310
   ScaleWidth     =  11700
   Top            =  -15
   Width          =  11820
   Begin VB.Timer IntialTime
      Enabled        =  0   'False
      Interval       =  30
      Left           =  10335
      Top            =  105
   End
   Begin VB.CommandButton Command10
      Caption        =  "Command10"
      Height         =  330
      Left           =  10320
      TabIndex       =  36
      Top            =  5100
      Visible        =  0   'False
      Width          =  405
   End
   Begin VB.CommandButton Command9
      Caption        =  "Command9"
      Height         =  345
      Left           =  10335
      TabIndex       =  35
      Top            =  5460
      Visible        =  0   'False
      Width          =  435
   End
   Begin VB.CommandButton Command8
      Caption        =  "Command8"
      Height         =  390
      Left           =  10365
      TabIndex       =  34
      Top            =  5865
      Visible        =  0   'False
      Width          =  360
   End
   Begin VB.CommandButton Command7
      Caption        =  "Command7"
      Height         =  360
      Left           =  10380
      TabIndex       =  33
      Top            =  6240
      Visible        =  0   'False
      Width          =  525
   End
   Begin VB.TextBox Text6
      Height         =  465
      Left           =  10365
      TabIndex       =  20
      Text           =  "Text6"
      Top            =  2565
      Visible        =  0   'False
      Width          =  555
   End
   Begin VB.CommandButton Command6
      Caption        =  "command6"
      Height         =  465
      Left           =  10800
      TabIndex       =  19
      Top            =  5040
      Visible        =  0   'False
      Width          =  495
   End
   Begin VB.CommandButton Command5
      Caption        =  " command"
      Height         =  390
      Left           =  10890
      TabIndex       =  18
      Top            =  5535
      Visible        =  0   'False
      Width          =  555
   End
   Begin VB.CommandButton Command4
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Caption         =   "Command4"
    Height          =   345
    Left            =   10935
    TabIndex        =   17
    Top             =   5955
    Visible         =   0   'False
    Width           =   630
End
Begin VB.CommandButton Command3
    Caption         =   "Command3"
    Height          =   435
    Left            =   11025
    TabIndex        =   16
    Top             =   6345
    Visible         =   0   'False
    Width           =   570
End
Begin VB.CommandButton Command2
    Caption         =   "Command2"
    Height          =   375
    Left            =   10275
    TabIndex        =   0
    Top             =   6660
    Visible         =   0   'False
    Width           =   720
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
    Height          =   1590
    Index           =   0
    Left            =   15
    TabIndex        =   1
    Top             =   -15
    Width           =   5085
    _version        =   65536
    _extentx        =   8969
    _extenty        =   2805
    _stockprops     =   15
    caption         =   "SSPanel2"
    bevelinner      =   1
    Begin VB.TextBox Text1
        ForeColor       =   &H00C00000&
        Height          =   1140
        Index           =   0
        Left            =   210
        MultiLine       =   -1  'True
        ScrollBars      =   2  'Vertical
        TabIndex        =   2
        Top             =   225
        Width           =   3330
    End
    Begin VB.Label Label1
        Caption         =   "Voltage"
        ForeColor       =   &H00404040&
        Height          =   210
        Left            =   4230
        TabIndex        =   40
        Top             =   105
        Width           =   705
    End
    Begin MSGrid.Grid Grid1
        Height          =   1095
        Index           =   0
        Left            =   3630
        TabIndex        =   3
        Top             =   360
        Width           =   1320
        _version        =   65536
        _extentx        =   2328
        _extenty        =   1931
        _stockprops     =   77
        forecolor       =   192
        backcolor       =   16777215
        rows            =   700
        fixedrows       =   0
        fixedcols       =   0
        scrollbars      =   2
        mouseicon       =   "ANN1.frx":0442
    End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel3
    Height          =   1605
    Left            =   15
    TabIndex        =   4
    Top             =   1575
    Width           =   5085
    _version        =   65536
    _extentx        =   8969
    _extenty        =   2831
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    _stockprops     =  15
    caption         =  "SSPanel3"
    bevelinner      =  1
    Begin VB.TextBox Text1
       ForeColor       =  &H00C00000&
       Height          =  1230
       Index           =  1
       Left            =  225
       MultiLine       =  -1  'True
       ScrollBars      =  2  'Vertical
       TabIndex        =  8
       Top             =  225
       Width           =  3285
    End
    Begin VB.Label Label2
       Caption         =  "Voltage"
       ForeColor       =  &H00404040&
       Height          =  210
       Left            =  4230
       TabIndex        =  41
       Top             =  120
       Width           =  705
    End
    Begin MSGrid.Grid Grid1
       Height          =  1095
       Index           =  1
       Left            =  3585
       TabIndex        =  12
       Top             =  375
       Width           =  1350
       _version        =  65536
       _extentx        =  2381
       _extenty        =  1931
       _stockprops     =  77
       forecolor       =  192
       backcolor       =  16777215
       rows            =  700
       fixedrows       =  0
       fixedcols       =  0
       scrollbars      =  2
       mouseicon       =  "ANN1.frx":045E
    End
 End
 Begin Threed.SSPanel SSPanel4
    Height          =  1560
    Left            =  0
    TabIndex        =  5
    Top             =  3180
    Width           =  5115
    _version        =  65536
    _extentx        =  9022
    _extenty        =  2752
    _stockprops     =  15
    caption         =  "SSPanel4"
    bevelinner      =  1
    Begin VB.TextBox Text1
       ForeColor       =  &H00C00000&
       Height          =  1140
       Index           =  2
       Left            =  240
       MultiLine       =  -1  'True
       ScrollBars      =  2  'Vertical
       TabIndex        =  9
       Top             =  225
       Width           =  3285
    End
    Begin VB.Label Label3
       Caption         =  "Voltage"
       ForeColor       =  &H00404040&
       Height          =  195
       Left            =  4230
       TabIndex        =  42
       Top             =  75
       Width           =  675
    End
    Begin MSGrid.Grid Grid1
       Height          =  1095
       Index           =  2
       Left            =  3615
       TabIndex        =  13
       Top             =  330
       Width           =  1335
       _version        =  65536
       _extentx        =  2355
       _extenty        =  1931
       _stockprops     =  77
       forecolor       =  192
       backcolor       =  16777215
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    rows            =  700
    fixedrows       =  0
    fixedcols       =  0
    scrollbars      =  2
    mouseicon       =  "ANN1.frx":047A
  End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel5
  Height          =  1575
  Left            =  0
  TabIndex        =  6
  Top             =  4740
  Width           =  5115
  _version        =  65536
  _extentx        =  9022
  _extenty        =  2778
  _stockprops     =  15
  caption         =  "SSPanel5"
  bevelinner      =  1
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor       =  &H00C00000&
    Height          =  1140
    Index           =  3
    Left            =  210
    MultiLine       =  -1  'True
    ScrollBars      =  2  'Vertical
    TabIndex        =  10
    Top             =  165
    Width           =  3330
  End
  Begin VB.Label Label5
    Caption         =  "Voltage"
    ForeColor       =  &H00404040&
    Height          =  195
    Left            =  4200
    TabIndex        =  43
    Top             =  90
    Width           =  720
  End
  Begin MSGrid.Grid Grid1
    Height          =  1095
    Index           =  3
    Left            =  3555
    TabIndex        =  14
    Top             =  315
    Width           =  1365
    _version        =  65536
    _extentx        =  2408
    _extenty        =  1931
    _stockprops     =  77
    forecolor       =  192
    backcolor       =  16777215
    rows            =  700
    fixedrows       =  0
    fixedcols       =  0
    scrollbars      =  2
    mouseicon       =  "ANN1.frx":0496
  End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel6
  Height          =  1560
  Left            =  30
  TabIndex        =  7
  Top             =  6315
  Width           =  5085
  _version        =  65536
  _extentx        =  8969
  _extenty        =  2752
  _stockprops     =  15
  caption         =  "SSPanel6"
  bevelinner      =  1
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor       =  &H00C00000&
    Height          =  1140
    Index           =  4
    Left            =  195
    MultiLine       =  -1  'True
    ScrollBars      =  2  'Vertical
    TabIndex        =  11
    Top             =  195
    Width           =  3285
  End
  Begin VB.Label Label6
    Caption         =  "Voltage"
    ForeColor       =  &H00404040&
    Height          =  210
    Left            =  4155
    TabIndex        =  44
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Top             =   75
      Width           =   735
   End
   Begin MSGrid.Grid Grid1
      Height          =   1095
      Index           =   4
      Left            =   3555
      TabIndex        =   15
      Top             =   345
      Width           =   1395
      _version        =   65536
      _extentx        =   2461
      _extenty        =   1931
      _stockprops     =   77
      forecolor       =   192
      backcolor       =   16777215
      rows            =   700
      fixedrows       =   0
      fixedcols       =   0
      scrollbars      =   2
      mouseicon       =   "ANN1.frx":04B2
   End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
   Height          =   1590
   Index           =   1
   Left            =   5145
   TabIndex        =   21
   Top             =   -15
   Width           =   5085
   _version        =   65536
   _extentx        =   8969
   _extenty        =   2805
   _stockprops     =   15
   caption         =   "SSPanel2"
   bevelinner      =   1
   Begin VB.TextBox Text1
      ForeColor       =   &H00C00000&
      Height          =   1140
      Index           =   5
      Left            =   195
      MultiLine       =   -1  'True
      ScrollBars      =   2  'Vertical
      TabIndex        =   22
      Top             =   210
      Width           =   3345
   End
   Begin VB.Label Label7
      Caption         =   "Voltage"
      Height          =   255
      Left            =   4230
      TabIndex        =   45
      Top             =   75
      Width           =   735
   End
   Begin MSGrid.Grid Grid1
      Height          =   1095
      Index           =   5
      Left            =   3630
      TabIndex        =   23
      Top             =   345
      Width           =   1320
      _version        =   65536
      _extentx        =   2328
      _extenty        =   1931
      _stockprops     =   77
      forecolor       =   192
      backcolor       =   16777215
      rows            =   700
      fixedrows       =   0
      fixedcols       =   0
      scrollbars      =   2
      mouseicon       =   "ANN1.frx":04CE
   End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
   Height          =   1590
   Index           =   2
   Left            =   5145
   TabIndex        =   24
   Top             =   1575
   Width           =   5085
   _version        =   65536
   _extentx        =   8969
   _extenty        =   2805
   _stockprops     =   15
   caption         =   "SSPanel2"
   bevelinner      =   1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor      =  &H00C00000&
    Height         =  1140
    Index          =  6
    Left           =  195
    MultiLine      =  -1  'True
    ScrollBars     =  2  'Vertical
    TabIndex       =  25
    Top            =  210
    Width          =  3375
  End
  Begin VB.Label Label8
    Caption        =  "Voltage"
    Height         =  210
    Left           =  4275
    TabIndex       =  46
    Top            =  105
    Width          =  690
  End
  Begin MSGrid.Grid Grid1
    Height         =  1095
    Index          =  6
    Left           =  3675
    TabIndex       =  26
    Top            =  360
    Width          =  1320
    _version       =  65536
    _extentx       =  2328
    _extenty       =  1931
    _stockprops    =  77
    forecolor      =  192
    backcolor      =  16777215
    rows           =  700
    fixedrows      =  0
    fixedcols      =  0
    scrollbars     =  2
    mouseicon      =  "ANN1.frx":04EA
  End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
  Height         =  1590
  Index          =  3
  Left           =  5145
  TabIndex       =  27
  Top            =  3180
  Width          =  5100
  _version       =  65536
  _extentx       =  8996
  _extenty       =  2805
  _stockprops    =  15
  caption        =  "SSPanel2"
  bevelinner     =  1
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor      =  &H00C00000&
    Height         =  1140
    Index          =  7
    Left           =  225
    MultiLine      =  -1  'True
    ScrollBars     =  2  'Vertical
    TabIndex       =  28
    Top            =  195
    Width          =  3360
  End
  Begin VB.Label Label9
    Caption        =  "Voltage"
    Height         =  210
    Left           =  4275
    TabIndex       =  47
    Top            =  105
    Width          =  660
  End
  Begin MSGrid.Grid Grid1
    Height         =  1095
    Index          =  7
    Left           =  3645
    TabIndex       =  29
    Top            =  360
    Width          =  1320
    _version       =  65536
    _extentx       =  2328
    _extenty       =  1931
    _stockprops    =  77
    forecolor      =  192
    backcolor      =  16777215
    rows           =  700
    fixedrows      =  0
    fixedcols      =  0
    scrollbars     =  2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    mouseicon      =   "ANN1.frx":0506
  End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
  Height         =   1590
  Index          =   4
  Left           =   5145
  TabIndex       =   30
  Top            =   4755
  Width          =   5100
  _version       =   65536
  _extentx       =   8996
  _extenty       =   2805
  _stockprops    =   15
  caption        =   "SSPanel2"
  bevelinner     =   1
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor      =   &H00C00000&
    Height         =   1140
    Index          =   8
    Left           =   210
    MultiLine      =   -1  'True
    ScrollBars     =   2  'Vertical
    TabIndex       =   31
    Top            =   195
    Width          =   3345
  End
  Begin VB.Label Label10
    Caption        =   "Voltage"
    Height         =   195
    Left           =   4245
    TabIndex       =   48
    Top            =   105
    Width          =   705
  End
  Begin MSGrid.Grid Grid1
    Height         =   1095
    Index          =   8
    Left           =   3630
    TabIndex       =   32
    Top            =   330
    Width          =   1320
    _version       =   65536
    _extentx       =   2328
    _extenty       =   1931
    _stockprops    =   77
    forecolor      =   192
    backcolor      =   16777215
    rows           =   700
    fixedrows      =   0
    fixedcols      =   0
    scrollbars     =   2
    mouseicon      =   "ANN1.frx":0522
  End
End
Begin Threed.SSPanel SSPanel2
  Height         =   1530
  Index          =   5
  Left           =   5145
  TabIndex       =   37
  Top            =   6345
  Width          =   5085
  _version       =   65536
  _extentx       =   8969
  _extenty       =   2699
  _stockprops    =   15
  caption        =   "SSPanel2"
  bevelinner     =   1
  Begin VB.TextBox Text1
    ForeColor      =   &H00C00000&
    Height         =   1140
    Index          =   9
    Left           =   195
    MultiLine      =   -1  'True
    ScrollBars     =   2  'Vertical
    TabIndex       =   38
    Top            =   210
    Width          =   3360
  End
  Begin VB.Label Label11
    Caption        =   "Voltage"
    Height         =   225
    Left           =   4275
    TabIndex       =   49
    Top            =   90
    Width          =   645
  End
  Begin MSGrid.Grid Grid1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Height          =   1095
    Index           =   9
    Left            =   3630
    TabIndex        =   39
    Top             =   360
    Width           =   1320
    _version        =   65536
    _extentx        =   2328
    _extenty        =   1931
    _stockprops     =   77
    forecolor       =   192
    backcolor       =   16777215
    rows            =   700
    fixedrows       =   0
    fixedcols       =   0
    scrollbars      =   2
    mouseicon       =   "ANN1.frx":053E
  End
End
Begin VB.Label PopUp
  Alignment       =   2  'Center
  BackColor       =   &H00C0FFFF&
  BorderStyle     =   1  'Fixed Single
  Caption         =   "กำลังติดต่อรับ ข้อมูลอยู่ ห้ามยุ่ง !"
  BeginProperty Font
    name          =   "DilleniaUPC"
    charset       =   1
    weight        =   400
    size          =   18
    underline     =   0   'False
    italic        =   0   'False
    strikethrough =   0   'False
  EndProperty
  ForeColor       =   &H00FF0000&
  Height          =   405
  Left            =   675
  TabIndex        =   52
  Top             =   7905
  Visible         =   0   'False
  Width           =   7920
End
Begin Threed.SSCommand command1
  Default         =   -1  'True
  Height          =   645
  Left            =   10275
  TabIndex        =   51
  Top             =   1845
  Width           =   1335
  _version        =   65536
  _extentx        =   2355
  _extenty        =   1138
  _stockprops     =   78
  caption         =   "&Down Load"
  forecolor       =   12582912
  BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
    name          =   "MS Sans Serif"
    charset       =   1
    weight        =   700
    size          =   9.75
    underline     =   0   'False
    italic        =   0   'False
    strikethrough =   0   'False
  EndProperty
  font3d          =   1
End
Begin Threed.SSCommand command11
  Cancel          =   -1  'True
  Height          =   615
  Left            =   10305
  TabIndex        =   50
  Top             =   3825
  Width           =   1305
  _version        =   65536
  _extentx        =   2302
  _extenty        =   1085
  _stockprops     =   78
  caption         =   "Cancel"
  forecolor       =   192
  BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
    name          =   "MS Sans Serif"
    charset       =   1
    weight        =   700
    size          =   9.75
    underline     =   0   'False
    italic        =   0   'False
    strikethrough =   0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    EndProperty
    font3d          =  1
  End
  Begin MSCommLib.MSComm MSComm1
    Left            =  10785
    Top             =  60
    _version        =  65536
    _extentx        =  847
    _extenty        =  847
    _stockprops     =  0
    cdtimeout       =  0
    commport        =  1
    ctstimeout      =  0
    dsrtimeout      =  0
    dtrenable       =  -1  'True
    handshaking     =  0
    inbuffersize    =  1024
    inputlen        =  0
    interval        =  1000
    nulldiscard     =  0   'False
    outbuffersize   =  512
    parityreplace   =  "?"
    rthreshold      =  0
    rtsenable       =  0   'False
    settings        =  "9600,n,8,1"
    sthreshold      =  0
  End
  Begin MSComDlg.CommonDialog DialogBox1
    Left            =  10530
    Top             =  705
    _version        =  65536
    _extentx        =  847
    _extenty        =  847
    _stockprops     =  0
    defaultext      =  "COD"
    filename        =  "C:\public\mink\1_mink"
    filter          =  $"ANN1.frx":055A
  End
  Begin VB.Menu mnuFile
    Caption         =  "&File"
    Begin VB.Menu mnuFileNew
      Caption       =  "&New"
    End
    Begin VB.Menu mnuFileOpen
      Caption       =  "&Open"
    End
    Begin VB.Menu mnuFileSave
      Caption       =  "&Save"
    End
    Begin VB.Menu mnuFileSaveas
      Caption       =  "Save &As"
    End
    Begin VB.Menu mnuFilePrint
      Caption       =  "&Print"
    End
    Begin VB.Menu mnuNull1
      Caption       =  "-"
    End
    Begin VB.Menu mnuFileExit
      Caption       =  "&Exit"
    End
  End
  Begin VB.Menu mnuGraph
    Caption         =  "&Graph"
    Begin VB.Menu mnuGraphGraph
      Caption       =  "&Graph"
    End
  End
  Begin VB.Menu mnuHelp
    Caption         =  "&Help"
    Begin VB.Menu mnuHelpHow
      Caption       =  "How to use program"
    End
    Begin VB.Menu mnuHelpFunction
      Caption       =  "Menu function"
    End
    Begin VB.Menu mnuHelpAbout
      Caption       =  "&About Program"
    End
  End
End
Attribute VB_Name = "Ann1"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False
Dim PointSaveName$


Private Sub Command1_Click()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Text1(0).Text = ""
Text1(1).Text = ""
Text1(2).Text = ""
Text1(3).Text = ""
Text1(4).Text = ""
Text1(5).Text = ""
Text1(6).Text = ""
Text1(7).Text = ""
Text1(8).Text = ""
Text1(9).Text = ""
command1.Enabled = False
PopUp.Caption = "กำลังติดต่อรับข้อมูลอยู่ กรุณารอคอยอย่าง
สงบ !"
PopUp.Visible = True
text6.Text = ""
MSComm1.Output = "d"
MSComm1.Output = Chr(13) + Chr(10)
IntialTime.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command1_MouseMove(Button As Integer,
Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
'   Condition.Caption = "  ติดต่อรับข้อมูลจาก Serial Port"

End Sub



Private Sub Command10_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(9).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
    text6.Text = "End"
    ScanData
    GiveData
    PopUp.Caption = "รับข้อมูลเรียบร้อยแล้วเชิญใช้ได้ตาม
สบาย"
    command1.Enabled = True
End Sub


Private Sub Command11_Click()
    Ann2.Show
    Ann1.Hide
    MSComm1.PortOpen = False
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Dim Msg$, J$, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(1).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command3_Click

End Sub

Private Sub Command3_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(2).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command4_Click
End Sub


Private Sub Command4_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(3).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command5_Click

End Sub
```

```
Private Sub Command5_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(4).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command6_Click

End Sub

Private Sub Command6_Click()
 Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(5).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Command7_Click
End Sub

Private Sub Command7_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(6).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command8_Click

End Sub

Private Sub Command8_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(7).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command9_Click

End Sub

Private Sub Command9_Click()
Dim Msg, J, M As String
'Dim B As Object
Dim I As Integer
'Set B = Text2
Msg = ""
J = ""
text6.Text = ""
MSComm1.Output = Chr$(32)
I = 1
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(8).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
'Call ScanData(B)
Command10_Click

End Sub

Private Sub Form_Load()
Dim I As Integer
ChDrive CurDir
ChDir App.Path
        AnnIntro1.Timer1.Enabled = True
        Ann2.Timer2.Enabled = True
        Ann1.Visible = False
        AnnIntro1.Show
        'กึ่งกลาง
    For I = 0 To 9
        Ann1.Grid1(I).FixedAlignment(0) = 2
        Ann1.Grid1(I).FixedAlignment(1) = 2
        Ann1.Grid1(I).ColAlignment(0) = 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Ann1.Grid1(I).ColAlignment(1) = 2
    '    Ann1.Grid1(I).ColWidth(0) = 1000
    '    Ann1.Grid1(I).ColWidth(1) = 1000
    Next I
End Sub


Private Sub Form_MouseMove(Button As Integer, Shift
As Integer, X As Single, Y As Single)
    PopUp.Visible = False
End Sub


Private Sub Grid1_MouseMove(Index As Integer, Button
As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
    PopUp.Visible = False
End Sub

Private Sub IntialTime_Timer()
Dim M$, J$, Msg As String
Dim Mink As Integer
IntialTime.Enabled = False
MSComm1.Output = Chr(32)
I = 1
J = ""
Do
        DoEvents
        Msg = MSComm1.Input
        Text1(0).SelText = Msg
        I = I + 1
        text6.Text = I
        'If I > 300 And Len(Text1(0).Text) < 40 Then
GoTo NotConnect
        M = Right(Msg, 1)
        J = Right(Msg, 2)
Loop Until M = ":" Or J = ":>"
Command2_Click
'ScanData
'GiveData
Exit Sub

NotConnect:
    PopUp.Visible = False
    Mink = MsgBox("ลองตรวจสอบดูซิว่าเครื่องมือต่ออยู่หรือ
ไม่", 0, "ติดต่อรับข้อมูลไม่ได้")
End Sub

Private Sub mnuFileExit_Click()
    End
End Sub

Private Sub mnuFileNew_Click()
' Select New file to Save Data
    If Len(Text1(0).Text) > 0 Then
        If PointSaveName = "" Then
            Response = MsgBox("Do you want to open
NEW file? ", 4 + 32 + 0, "แฟ้มข้อมูลเดิมยังไม่ถูกจัดเก็บ")
            If Response = 7 Then Exit Sub
        Else
            Response = MsgBox("Do you want to Save
Data Again IN File  " & PointSaveName, 3 + 32 + 0, "ย้ำ
ความแน่ใจ")
            If Response = 6 Then
              Savefile (PointSaveName)
            ElseIf Response = 2 Then: Exit Sub
            End If
        End If
End If
    For I = 0 To 9
      Text1(I).Text = ""
    Next I
    PointSaveName = ""
    ClearGrid
    AnnGraph.Graph1.DataReset = 9
    AnnGraph.Graph1.GraphTitle = ""
    AnnGraph.Graph1.LeftTitle = ""
    AnnGraph.Graph1.BottomTitle = ""
    AnnGraph.Graph1.DrawMode = 2

End Sub

Private Sub mnuFileOpen_Click()
Dim Answer As Integer
    DialogBox1.DialogTitle = "เปิดแฟ้มข้อมูลเก่า"
    DialogBox1.filename = "C:\TRANSIEN.COD"
    DialogBox1.DefaultExt = "TXT"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    DialogBox1.Flags = &H4& Or &H8& Or &H400& Or
&H800& Or H1000& Or &H2000&

    On Error GoTo HaveError
    DialogBox1.Action = 1
    If Err = 32755 Then Exit Sub ' เมื่อ Click Cancel จะ
ออกจาก Sub
    PointSaveName$ = DialogBox1.filename
    ' ต้องตรวจดูว่า filename ที่รับเข้ามานั้น เขียน .cod มาด้วย
หรือเปล่า
    Openfile (PointSaveName$)
    GiveData
    Exit Sub

HaveError: If Err = 32761 Or Err = 32760 Or Err = 20477
Then
                MsgBox "Have failed to Load Error", ,
"Error"
            End If
End Sub

Private Sub mnuFilePrint_Click()
Dim I%, J%, Statement$, Rest$
'    Condition.Caption = " กำลังทำการพิมพ์ข้อมูลอยู่"
' สั่งพิมพ์ข้อมูลใน files *.txt
    Printer.FontName = "Angsana New"
    Printer.FontSize = 14
    DialogBox1.PrinterDefault = False
    DialogBox1.Action = 5
    'Printer.Copies = 1
    'Printer.FromPage = DialogBox1.FromPage
    'Printer.ToPage = DialogBox1.ToPage
    'Printer.hDC
    On Error Resume Next
    Printer.Print Spc(32); "ข้อมูล Transient signal
digitizer"
    If Err = 28664 Then
        Response = MsgBox("Printer that connect ?", 0 +
64 + 0, "Printer Not Connect")
        Exit Sub
    End If
    Printer.FontSize = 12
    Printer.Print Spc(20); "วัน / เดือน / ปี "; Spc(20); "เวลา";
Spc(20); "Voltage "
    Printer.FontSize = 10
    Printer.FontBold = False
        For I = 0 To DTable.Rows - 1
            DTable.Row = I
            DTable.Col = 0
            Rest = DTable.Text
            Statement = Space(46) & Rest & Space(46)
            DTable.Col = 1
            Rest = DTable.Text
            Statement = Statement & Rest & Space(40)
            DTable.Col = 2
            Rest = DTable.Text & Space(2) & "V"
            Statement = Statement & Rest
          ' DTable.Col = 3
          '  Rest = DTable.Text & Space(2) & "A"
          ' Statement = Statement & Rest & Space(35)
           'DTable.Col = 4
           'Rest = DTable.Text
           'Statement = Statement & Rest
           Printer.Print Statement
        Next I
        Printer.EndDoc

End Sub

Private Sub mnuFileSave_Click()
    If PointSaveName = "" Then
        DialogBox1.filename = "C:\TRANSIEN.COD"
        DialogBox1.DefaultExt = "COD"
        DialogBox1.DialogTitle = "บันทึก"
        DialogBox1.Flags = &H4& Or &H8& Or &H400&
Or &H800&
        On Error Resume Next
        DialogBox1.Action = 2
        If Err = 32755 Then Exit Sub
        PointSaveName$ = DialogBox1.filename
    End If
    Call Savefile(PointSaveName$)
' บันทึกข้อมูลที่มีอยู่ลงไปในไฟล์ขณะทำการ link กับ serial port
เก็บทั้งที่เป็น *.cod และ *.txt
' โดย *.cod จะเอาไว้ใช้ตอนเปิดไฟล์ ส่วน *.txt จะเอาไว้ใช้ตอน
ตรวจดูและ Print files
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Private Sub mnuFileSaveas_Click()
' คล้าย ๆ กับ Save files แค่ทำการ บันทึกค่าปัจจุบันในชื่อไฟล์
ใหม่
    DialogBox1.DialogTitle = "Save As"
    DialogBox1.filename = "C:\TRNSENT1.COD"
    DialogBox1.DefaultExt = "COD"
    DialogBox1.Flags = &H4& Or &H2& Or &H8& Or &
H400& Or &H800& Or &H1000& Or &H2000&
    On Error Resume Next
    DialogBox1.Action = 2
    If Err = 32755 Then Exit Sub
    PointSaveName$ = DialogBox1.filename
    Savefile (PointSaveName$)

End Sub

Private Sub mnuGraphGraph_Click()
    AnnGraph.Show
    Ann1.Hide
End Sub



Private Sub mnuHelpAbout_Click()
    Shell ("winhelp ann.hlp")
End Sub

Private Sub mnuHelpFunction_Click()
    Shell ("winhelp ann.hlp")
End Sub

Private Sub mnuHelpHow_Click()
    Shell ("winhelp ann.hlp")
End Sub

Public Sub ClearGrid()
Dim I As Integer
    For I = 0 To 9
    Grid1(I).SelStartCol = 0
    Grid1(I).SelStartRow = 0
    Grid1(I).SelEndCol = Grid1(I).Cols - 1
    Grid1(I).SelEndRow = Grid1(I).Rows - 1
    Grid1(I).FillStyle = 1
    Grid1(I).Text = ""
    Grid1(I).FillStyle = 0
    Grid1(I).SelEndCol = 0
    Grid1(I).SelEndRow = 0
    Text1(I).Text = ""
    Next I
End Sub



Public Sub Savefile(FileC As String)
Dim I%
I = 0
' บันทึกแฟ้มเป็น code file เอาไว้ เพื่อOpen
Open FileC For Output As #1 '(อาจจะต้องทำเป็น binary)
Print #1, Text1(0).Text
Print #1, Text1(1).Text
Print #1, Text1(2).Text
Print #1, Text1(3).Text
Print #1, Text1(4).Text
Print #1, Text1(5).Text
Print #1, Text1(6).Text
Print #1, Text1(7).Text
Print #1, Text1(8).Text
Print #1, Text1(9).Text
Close #1
' บันทึกแฟ้มเป็นรูปแบบ text file
End Sub


Public Sub Openfile(FileA As String)
Dim MyFile As String, I%
Dim MyData, MeData As String
  I = 0
  Open FileA For Input As #2
  Do While Not EOF(2)
    Line Input #2, MeData
    If Len(MeData) > 10 Then
      I = I + 1
      MyData = MeData
      Do Until Len(MeData) < 10
        Line Input #2, MeData
        If Len(MeData) > 10 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            MyData = MyData + Chr(13) + Chr(10) +
MeData
            End If
        Loop

        Select Case I
        Case 1
            Text1(0).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 2
            Text1(1).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 3
            Text1(2).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 4
            Text1(3).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 5
            Text1(4).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 6
            Text1(5).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 7
            Text1(6).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 8
            Text1(7).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 9
            Text1(8).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""
        Case 10
            Text1(9).Text = MyData + Chr(13) + Chr(10)
+ ":"
            MyData = ""

        End Select
      End If
    Loop
    Close #2
End Sub


Public Sub GiveData()
Dim LineData, Temp, Tempo, M, A As String
Dim G%, I%, K%, Mink%, L As Integer
Static Z%
    Z = 0
    For I = 0 To 9
'I = 0
    G = 0
    K = 0
    L = 0
    Do
      K = K + 1
      A = Mid(Text1(I).Text, K, 1)
      If A = ":" Then Exit Do
      If A = Chr(13) Then
        LineData = M
        K = K + 1
        M = ""
      For L = 1 To Len(LineData) Step 2
        Temp = Mid(LineData, L, 2)
        Ann1.Grid1(I).Row = G
        Ann1.Grid1(I).Col = 1
        Ann1.Grid1(I).Text = Temp
        Ann1.Grid1(I).Col = 0
        Ann1.Grid1(I).Text = G + 1 + Z
        G = G + 1
        'If G = 12802 Then
        '   Mink = G
        'End If
      Next L
    Else
      M = M + A
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        End If
    Loop
    If Z = 0 Then AnnGraph.HScroll1.Max = G
    Z = G + Z
    Next I

End Sub



Public Sub ScanData()
Dim K%, I%, L%, B%
Dim G$, MeData$, MyData As String
   For L = 0 To 9
 'L = 0
   K = 0     .
   I = 0
   Do
      K = K + 1
      G = Mid(Text1(L), K, 1)
      If G = ":" Then Exit Do
      If G = Chr(13) Then
         B = B + 1
         MeData = M
         If L = 0 Then
            If B = 2 Or B = 1 Then MeData = ""
         End If
         K = K + 1
         M = ""
         If Len(MeData) > 10 Then
            I = I + 1
            If I = 1 Then
               MyData = MeData
            Else
               MyData = MyData + Chr(13) + Chr(10) +
MeData
            End If
         End If
         If B = 4 Then Exit Do 'ตรวจสอบว่า เจอ enter 4
ครั้ง
      Else
         M = M + G
      End If
   Loop
   B = 0
   Text1(L).Text = MyData + Mid(Text1(L), K, (Len
(Text1(L)) - K)) + ":" 'Chr(13) + Chr(10) + ":"
   Next L

End Sub



Private Sub Text1_MouseMove(Index As Integer, Button
As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
   PopUp.Visible = False
End Sub



Private Sub Timer1_Timer()
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Ann2
   Caption        =  "Setting Port to Connection"
   ClientHeight   =  8565
   ClientLeft     =  270
   ClientTop      =  420
   ClientWidth    =  10950
   Height         =  8970
   Left           =  210
   LinkTopic      =  "Form2"
   LockControls   =  -1  'True
   ScaleHeight    =  8565
   ScaleWidth     =  10950
   Top            =  75
   Width          =  11070
   Begin VB.PictureBox Picture4
      Appearance     =  0  'Flat
      BackColor      =  &H00C0C0C0&
      BorderStyle    =  0  'None
      ForeColor      =  &H80000008&
      Height         =  405
      Left           =  7410
      Picture        =  "ANN2.frx":0000
      ScaleHeight    =  405
      ScaleWidth     =  510
      TabIndex       =  10
      Top            =  5760
      Width          =  510
   End
   Begin VB.PictureBox Picture3
      Height         =  5460
      Left           =  1755
      Picture        =  "ANN2.frx":0442
      ScaleHeight    =  5430
      ScaleWidth     =  3900
      TabIndex       =  8
      Top            =  2475
      Width          =  3930
   End
   Begin VB.PictureBox Picture2
      BackColor      =  &H00C0C0C0&
      BorderStyle    =  0  'None
      Height         =  435
      Left           =  7380
      Picture        =  "ANN2.frx":32EC
      ScaleHeight    =  435
      ScaleWidth     =  435
      TabIndex       =  7
      Top            =  6975
      Width          =  435
   End
   Begin VB.PictureBox Picture1
      Appearance     =  0  'Flat
      BackColor      =  &H00C0C0C0&
      BorderStyle    =  0  'None
      ForeColor      =  &H80000008&
      Height         =  405
      Left           =  7365
      Picture        =  "ANN2.frx":331F6
      ScaleHeight    =  405
      ScaleWidth     =  435
      TabIndex       =  6
      Top            =  4725
      Width          =  435
   End
   Begin VB.Timer Timer2
      Interval       =  3000
      Left           =  9360
      Top            =  8040
   End
   Begin VB.OptionButton Option2
      Caption        =  "Comm 2"
      BeginProperty Font
         name           =  "MS Sans Serif"
         charset        =  1
         weight         =  400
         size           =  9.75
         underline      =  0   'False
         italic         =  0   'False
         strikethrough  =  0   'False
      EndProperty
      ForeColor      =  &H00C000C0&
      Height         =  375
      Left           =  8100
      TabIndex       =  4
      Top            =  3615
      Value          =  -1  'True
      Width          =  1110
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  End
  Begin VB.OptionButton Option1
    Caption         =   "Comm 1"
    BeginProperty Font
      name          =   "MS Sans Serif"
      charset       =   1
      weight        =   400
      size          =   9.75
      underline     =   0   'False
      italic        =   0   'False
      strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =   &H00C000C0&
    Height          =   375
    Left            =   8085
    TabIndex        =   3
    Top             =   3225
    Width           =   975
  End
  Begin Threed.SSFrame SSFrame4
    Height          =   1230
    Left            =   6900
    TabIndex        =   5
    Top             =   2835
    Width           =   2505
    _version        =   65536
    _extentx        =   4419
    _extenty        =   2170
    _stockprops     =   14
    caption         =   "Comm Port"
    forecolor       =   8388608
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name          =   "Angsana New"
      charset       =   1
      weight        =   400
      size          =   11.25
      underline     =   0   'False
      italic        =   0   'False
      strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    font3d          =   3
    shadowstyle     =   1
  End
  Begin Threed.SSPanel SSPanel1
    Height          =   855
    Left            =   1800
    TabIndex        =   0
    Top             =   1260
    Width           =   7335
    _version        =   65536
    _extentx        =   12938
    _extenty        =   1508
    _stockprops     =   15
    caption         =   "Transient Signal Digitizer"
    forecolor       =   192
    backcolor       =   12632064
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name          =   "Times New Roman"
      charset       =   1
      weight        =   400
      size          =   20.25
      underline     =   0   'False
      italic        =   -1  'True
      strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    bevelinner      =   2
    font3d          =   2
  End
  Begin Threed.SSCommand SSCommand3
    Height          =   675
    Left            =   7245
    TabIndex        =   9
    Top             =   5640
    Width           =   1665
    _version        =   65536
    _extentx        =   2937
    _extenty        =   1191
    _stockprops     =   78
    caption         =   "       &Help"
    forecolor       =   8388736
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name          =   "MS Sans Serif"
      charset       =   1
      weight        =   700
      size          =   12
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      underline     = 0   'False
      italic        = 0   'False
      strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    font3d        = 3
  End
  Begin MSCommLib.MSComm MSComm2
    Left          = 8040
    Top           = 8040
    _version      = 65536
    _extentx      = 847
    _extenty      = 847
    _stockprops   = 0
    cdtimeout     = 0
    commport      = 1
    ctstimeout    = 0
    dsrtimeout    = 0
    dtrenable     = -1  'True
    handshaking   = 0
    inbuffersize  = 1024
    inputlen      = 0
    interval      = 1000
    nulldiscard   = 0   'False
    outbuffersize = 512
    parityreplace = "?"
    rthreshold    = 0
    rtsenable     = 0   'False
    settings      = "9600,n,8,1"
    sthreshold    = 0
  End
  Begin Threed.SSCommand SSCommand2
    Cancel        = -1  'True
    Height        = 675
    Left          = 7215
    TabIndex      = 2
    Top           = 6870
    Width         = 1680
    _version      = 65536
    _extentx      = 2963
    _extenty      = 1191
    _stockprops   = 78
    caption       = "          &Exit"
    forecolor     = 255
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name        = "MS Sans Serif"
      charset     = 1
      weight      = 700
      size        = 9.75
      underline   = 0   'False
      italic      = 0   'False
      strikethrough = 0   'False
    EndProperty
  End
  Begin Threed.SSCommand SSCommand1
    Default       = -1  'True
    Height        = 690
    Left          = 7230
    TabIndex      = 1
    Top           = 4590
    Width         = 1725
    _version      = 65536
    _extentx      = 3043
    _extenty      = 1217
    _stockprops   = 78
    caption       = "          OK"
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name        = "MS Sans Serif"
      charset     = 1
      weight      = 700
      size        = 9.75
      underline   = 0   'False
      italic      = 0   'False
      strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    font3d        = 2
  End
End
Attribute VB_Name = "Ann2"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False

Private Sub Combo1_Change()

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Private Sub Combo2_Change()

End Sub

Private Sub Option1_Click()
Dim Receive As Integer
   Receive = MsgBox("แน่ใจหรือเปล่าว่า Mouse ไม่ได้ต่ออยู่ที่ Comm1 แล้วคุณคิดจะเลือกใช้ Comm1 ใช่หรือไม่", 4, "แน่ใจแล้วหรือ")
   If Receive = 6 Then
      Option1.Value = True
   Else
      Option2.Value = True
   End If
End Sub

Private Sub Picture1_Click()
   If Option1.Value = True Then
      Ann1.MSComm1.CommPort = 1
   ElseIf Option2.Value = True Then
      Ann1.MSComm1.CommPort = 2
   End If
   Ann1.MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"
   Ann1.MSComm1.InputLen = 0
   Ann1.MSComm1.InBufferSize = 32 ' ห้ามแก้ ความยาวเท่ากับ 32
   Ann1.MSComm1.PortOpen = True
   Ann1.Show
   Ann2.Hide
End Sub
Private Sub Picture2_Click()
End
End Sub

Private Sub Picture4_Click()
   Shell ("winhelp ann.hlp")

End Sub

Private Sub SSCommand1_Click()
   If Option1.Value = True Then
      Ann1.MSComm1.CommPort = 1
   ElseIf Option2.Value = True Then
      Ann1.MSComm1.CommPort = 2
   End If
   Ann1.MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"
   Ann1.MSComm1.InputLen = 0
   Ann1.MSComm1.InBufferSize = 32 ' ห้ามแก้ ความยาวเท่ากับ 32
   Ann1.MSComm1.PortOpen = True
   Ann1.Show
   Ann2.Hide
End Sub

Private Sub SSCommand2_Click()
   End
End Sub

Private Sub SSOption1_Click(Value As Integer)

End Sub

Private Sub SSOption2_Click(Value As Integer)

End Sub

Private Sub SSOption5_Click(Value As Integer)
Dim A, B, C As String
A = "Define Frequency of sampling"
B = "คุณต้องการค่าความถี่ในการ Sampling เท่าไร ? (หน่วยเป็น MHz)"
   C = InputBox(B, A, 1)
   If Val(C) < 2000000 Then
      RefreshTime = Val(C) * 1000
   Else
      RefreshTime = 1000
   End If

End Sub

Private Sub SSOption6_Click(Value As Integer)

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Private Sub Timer1_Timer()
    FormTime.Enabled = False
    Form1.Visible = True
    Introduction.ZOrder 0

End Sub


Private Sub SSCommand3_Click()
    Shell ("winhelp ann.hlp")

End Sub

Private Sub Timer2_Timer()
    Timer2.Enabled = False
    Ann2.Visible = True
    AnnIntro1.ZOrder 0

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form AnnGraph
   Caption        =  "Graph Transient Signal
Digitizer"
   ClientHeight   =  7740
   ClientLeft     =  615
   ClientTop      =  1005
   ClientWidth    =  10620
   Height         =  8430
   Left           =  555
   LinkTopic      =  "Form2"
   LockControls   =  -1  'True
   ScaleHeight    =  7740
   ScaleWidth     =  10620
   Top            =  375
   Width          =  10740
   Begin VB.HScrollBar HScroll1
      Height         =  270
      LargeChange    =  5
      Left           =  675
      TabIndex       =  4
      Top            =  5790
      Width          =  9120
   End
   Begin Threed.SSPanel SSPanel1
      Height         =  4365
      Left           =  675
      TabIndex       =  2
      Top            =  1425
      Width          =  9120
      _version       =  65536
      _extentx       =  16087
      _extenty       =  7699
      _stockprops    =  15
      caption        =  "SSPanel1"
      backcolor      =  12632256
      bevelinner     =  1
      Begin GraphLib.Graph Graph1
         Height         =  4185
         Left           =  60
         TabIndex       =  3
         Top            =  45
         Width          =  8970
         _version       =  65536
         _extentx       =  15822
         _extenty       =  7382
         _stockprops    =  96
         borderstyle    =  1
         graphcaption   =  "Time(second)"
         graphtitle     =  "Graph Show Transient
Voltage"
         lefttitle      =  "Voltage"
         randomdata     =  0
         colordata      =  0
         extradata      =  0
         extradata[]    =  0
         fontfamily     =  4
         fontsize       =  4
         fontsize[0]    =  200
         fontsize[1]    =  150
         fontsize[2]    =  100
         fontsize[3]    =  100
         fontstyle      =  4
         graphdata      =  1
         graphdata[]    =  5
         graphdata[0,0] =  0
         graphdata[0,1] =  0
         graphdata[0,2] =  0
         graphdata[0,3] =  0
         graphdata[0,4] =  0
         labeltext      =  0
         legendtext     =  0
         patterndata    =  0
         symboldata     =  0
         xposdata       =  0
         xposdata[]     =  0
      End
   End
   Begin Threed.SSFrame SSFrame1
      Height         =  1095
      Left           =  705
      TabIndex       =  5
      Top            =  120
      Width          =  5085
      _version       =  65536
      _extentx       =  8969
      _extenty       =  1931
      _stockprops    =  14
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    shadowstyle     =  1
  Begin Threed.SSOption SSOption10
    Height          =  270
    Left            =  3945
    TabIndex        =  15
    Top             =  630
    Width           =  900
    _version        =  65536
    _extentx        =  1588
    _extenty        =  476
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text10"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption9
    Height          =  285
    Left            =  3015
    TabIndex        =  14
    Top             =  645
    Width           =  840
    _version        =  65536
    _extentx        =  1482
    _extenty        =  503
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text8"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption8
    Height          =  285
    Left            =  1935
    TabIndex        =  13
    Top             =  645
    Width           =  915
    _version        =  65536
    _extentx        =  1614
    _extenty        =  503
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text6"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption7
    Height          =  240
    Left            =  1125
    TabIndex        =  12
    Top             =  660
    Width           =  765
    _version        =  65536
    _extentx        =  1349
    _extenty        =  423
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text4"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption6
    Height          =  240
    Left            =  240
    TabIndex        =  11
    Top             =  660
    Width           =  720
    _version        =  65536
    _extentx        =  1270
    _extenty        =  423
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text2"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption5
    Height          =  300
    Left            =  3945
    TabIndex        =  10
    Top             =  240
    Width           =  960
    _version        =  65536
    _extentx        =  1693
    _extenty        =  529
    _stockprops     =  78
    caption         =  "Text9"
    forecolor       =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption4
    Height          =  300
    Left            =  3030
    TabIndex        =  9
    Top             =  240
    Width           =  855
    _version        =  65536
    _extentx        =  1508
    _extenty        =  529
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    _stockprops    =  78
    caption        =  "Text7"
    forecolor      =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption3
    Height         =  270
    Left           =  1920
    TabIndex       =  8
    Top            =  255
    Width          =  705
    _version       =  65536
    _extentx       =  1244
    _extenty       =  476
    _stockprops    =  78
    caption        =  "Text5"
    forecolor      =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption2
    Height         =  315
    Left           =  1110
    TabIndex       =  7
    Top            =  240
    Width          =  735
    _version       =  65536
    _extentx       =  1296
    _extenty       =  556
    _stockprops    =  78
    caption        =  "Text3"
    forecolor      =  12582912
  End
  Begin Threed.SSOption SSOption1
    Height         =  300
    Left           =  240
    TabIndex       =  6
    Top            =  240
    Width          =  675
    _version       =  65536
    _extentx       =  1191
    _extenty       =  529
    _stockprops    =  78
    caption        =  "Text1"
    forecolor      =  12582912
    value          =  -1  'True
  End
  Begin Threed.SSCommand PrintGraph
    Height         =  540
    Left           =  4785
    TabIndex       =  17
    Top            =  6525
    Width          =  1365
    _version       =  65536
    _extentx       =  2408
    _extenty       =  953
    _stockprops    =  78
    caption        =  "PRINT"
    forecolor      =  16711935
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name         =  "MS Sans Serif"
      charset      =  1
      weight       =  400
      size         =  13.5
      underline    =  0   'False
      italic       =  0   'False
      strikethrough  =  0   'False
    EndProperty
    font3d         =  2
  End
  Begin VB.Label Label3
    BeginProperty Font
      name         =  "MS Sans Serif"
      charset      =  1
      weight       =  400
      size         =  13.5
      underline    =  0   'False
      italic       =  0   'False
      strikethrough  =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor      =  &H00FF0000&
    Height         =  540
    Left           =  9450
    TabIndex       =  16
    Top            =  1530
    Width          =  585
  End
  Begin MSComDlg.CommonDialog Dialogbox2
    Left           =  7785
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Top             =   7575
    _version        =   65536
    _extentx        =   847
    _extenty        =   847
    _stockprops     =   0
  End
  Begin Threed.SSCommand QuitCommand
    Height          =   525
    Left            =   7695
    TabIndex        =   1
    Top             =   6510
    Width           =   1350
    _version        =   65536
    _extentx        =   2381
    _extenty        =   926
    _stockprops     =   78
    caption         =   "&EXIT"
    forecolor       =   255
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name          =   "MS Sans Serif"
      charset       =   1
      weight        =   400
      size          =   13.5
      underline     =   0   'False
      italic        =   0   'False
      strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    font3d          =   2
  End
  Begin Threed.SSCommand PlotCommand
    Height          =   570
    Left            =   1395
    TabIndex        =   0
    Top             =   6495
    Width           =   1485
    _version        =   65536
    _extentx        =   2619
    _extenty        =   1005
    _stockprops     =   78
    caption         =   "&PLOT"
    forecolor       =   16711680
    BeginProperty font {FB8F0823-0164-101B-84ED-
08002B2EC713}
      name          =   "MS Sans Serif"
      charset       =   1
      weight        =   400
      size          =   9.75
      underline     =   0   'False
      italic        =   0   'False
      strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    font3d          =   2
  End
  Begin VB.Menu mnuType
    Caption         =   "&ชนิดของกราฟ"
    Begin VB.Menu mnuTypeBar
      Caption       =   "&Bar"
      Begin VB.Menu mnuTypeBar2D
        Caption     =   "2D Bar"
      End
      Begin VB.Menu mnuTypeBar3D
        Caption     =   "3D Bar"
      End
    End
    Begin VB.Menu mnuTypeLog
      Caption       =   "&Log/Lin"
    End
    Begin VB.Menu mnuTypeArea
      Caption       =   "&Area"
    End
    Begin VB.Menu mnuTypeLine
      Caption       =   "L&ine"
    End
    Begin VB.Menu mnuTypeScatter
      Caption       =   "&Scatter"
    End
  End
End
Attribute VB_Name = "AnnGraph"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False
Dim TypeGraph%, TypeText%


Private Sub Form_Load()
  TypeGraph% = 6
  TypeText% = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
End Sub


Private Sub HScroll1_Change()
        plotdata
End Sub

Private Sub mnuTypeArea_Click()
    TypeGraph% = 8
    PlotCommand_Click

End Sub


Private Sub mnuTypeBar2D_Click()
   TypeGraph% = 3
    PlotCommand_Click

End Sub


Private Sub mnuTypeBar3D_Click()
    TypeGraph% = 4
    PlotCommand_Click

End Sub


Private Sub mnuTypeLine_Click()
    TypeGraph% = 6
    PlotCommand_Click

End Sub


Private Sub mnuTypeLog_Click()
    TypeGraph% = 7
    PlotCommand_Click

End Sub
```

```
Private Sub mnuTypeScatter_Click()
    TypeGraph% = 9
    PlotCommand_Click

End Sub


Private Sub PlotCommand_Click()
        'ส่งค่าเขียนกราฟโดยมีค่า StarTR คือตำแหน่งแถวของ
ข้อมูลและต้องเลือกชนิดกราฟก่อน
        Graph1.GraphType = TypeGraph%
        Graph1.DataReset = 9 'Clear all Data
        Graph1.YAxisStyle = 1 'ให้เลือก Scale อัตโนมัติ
        Graph1.BottomTitle = "Time(second)"
        Graph1.NumSets = 1
        Graph1.NumPoints = 80
        Graph1.ThisSet = 1
        HScroll1.Value = 0
        Label3.Caption = TypeText
        plotdata
    End Sub


    Private Sub PrintGraph_Click()
        On Error Resume Next    ' ให้ไปดูถัดไป
        If Err = 32755 Then Exit Sub    ' จะเกิดขึ้นเมื่อมีการ
    Click cancel
        SSFrame1.Visible = False
        SSOption1.Visible = False
        SSOption2.Visible = False
        SSOption3.Visible = False
        SSOption4.Visible = False
        SSOption5.Visible = False
        SSOption6.Visible = False
        SSOption7.Visible = False
        SSOption8.Visible = False
        SSOption9.Visible = False
        SSOption10.Visible = False
        HScroll1.Visible = False
        PlotCommand.Visible = False
        Printgraph.Visible = False
        QuitCommand.Visible = False
        PrintForm
        SSFrame1.Visible = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    SSOption1.Visible = True
    SSOption2.Visible = True
    SSOption3.Visible = True
    SSOption4.Visible = True
    SSOption5.Visible = True
    SSOption6.Visible = True
    SSOption7.Visible = True
    SSOption8.Visible = True
    SSOption9.Visible = True
    SSOption10.Visible = True
    HScroll1.Visible = True
    PlotCommand.Visible = True
    Printgraph.Visible = True
    QuitCommand.Visible = True
End Sub

Private Sub QuitCommand_Click()
    Ann1.Show
    AnnGraph.Hide
End Sub


Private Sub SSOption1_Click(Value As Integer)
TypeText = 0
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption10_Click(Value As Integer)
TypeText = 9
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption2_Click(Value As Integer)
TypeText = 2
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption3_Click(Value As Integer)
TypeText = 4
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption4_Click(Value As Integer)
TypeText = 6
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption5_Click(Value As Integer)
TypeText = 8
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption6_Click(Value As Integer)
TypeText = 1
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption7_Click(Value As Integer)
TypeText = 3
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption8_Click(Value As Integer)
TypeText = 5
PlotCommand_Click
End Sub

Private Sub SSOption9_Click(Value As Integer)
TypeText = 7
PlotCommand_Click
End Sub


Public Sub plotdata()
Dim I%, J%
   J = 1
   For I = 1 To 80
      Graph1.ThisPoint = J
      Ann1.Grid1(TypeText).Row = I + HScroll1.Value

      Ann1.Grid1(TypeText).Col = 1
      Graph1.GraphData = Val(Ann1.Grid1(TypeText).
Text)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Ann1.Grid1(TypeText).Col = 0
        Graph1.LabelText = Ann1.Grid1(TypeText).Text

        'Ann1.Grid1(TypeText).Col = 1
        'Graph1.GraphData = Val(Ann1.Grid1
(TypeText).Text)
        J = J + 1
    Next I
    Graph1.DrawMode = 2
End Sub
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Printgraphf
   Caption        =   "PrintGraph"
   ClientHeight   =   6075
   ClientLeft     =   2160
   ClientTop      =   1440
   ClientWidth    =   6720
   Height         =   6480
   Left           =   2100
   LinkTopic      =   "Form2"
   ScaleHeight    =   6075
   ScaleWidth     =   6720
   Top            =   1095
   Width          =   6840
   Begin GraphLib.Graph Graph1
      Height         =   5535
      Left           =   120
      TabIndex       =   0
      Top            =   360
      Width          =   6495
      _version       =   65536
      _extentx       =   11456
      _extenty       =   9763
      _stockprops    =   96
      borderstyle    =   1
      randomdata     =   1
      colordata      =   0
      extradata      =   0
      extradata[]    =   0
      fontfamily     =   4
      fontsize       =   4
      fontsize[0]    =   200
      fontsize[1]    =   150
      fontsize[2]    =   100
      fontsize[3]    =   100
      fontstyle      =   4
      graphdata      =   0
      graphdata[]    =   0
      labeltext      =   0
      legendtext     =   0
      patterndata    =   0
      symboldata     =   0
      xposdata       =   0
      xposdata[]     =   0
   End
End
Attribute VB_Name = "Printgraphf"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False

Public Sub PlotData(Head As String, Typ As Integer,
StaR As Integer, StoR As Integer)
Dim I%, J%, L%
Dim A, B, C As Long
Dim K As Double
   J = 1
   Graph1.LegendText = Head
   ' Plot Graph
   For I = StaR To StoR
      Graph1.ThisPoint = J
      Ann1.DTable.Row = I
      'K = Val(Left(Form1.CodeData.List(I), 6))
      'Graph1.XPosData = K
      Ann1.DTable.Col = Typ
      Graph1.GraphData = Val(Ann1.DTable.Text)
      Ann1.DTable.Col = 1
      Graph1.LabelText = Ann1.DTable.Text
      J = J + 1
   Next I
   Graph1.DrawMode = 2
End Sub


Private Sub PlotCommand_Click()
   Dim I%, StartR%, StopR%, A%, B%, C%
   Dim X, Y, Z As Boolean
   X = False
   Z = False
   OffTime = 0
      Ann1.DTable.Col = 1
      For I = 0 To Ann1.DTable.Rows - 1
         Ann1.DTable.Row = I
         If Ann1.DTable.Text = StartTime.Text Then
            StartR = Ann1.DTable.Row ' ข้อมูลแถว
แรก
            Z = True
            Exit For
         ElseIf I = Ann1.DTable.Rows - 1 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            MsgBox "กำหนดค่าของช่วงเวลาเริ่มต้นใหม่",
, "ตรวจสอบดูอีกครั้ง"
            StartTime.SetFocus
          End If
        Next I
    If Z Then
        Ann1.DTable.Col = 1
        For I = StartR To Ann1.DTable.Rows - 1
          Ann1.DTable.Row = I
          If Ann1.DTable.Text = StopTime.Text Then
            StopR = Ann1.DTable.Row ' ข้อมูลแถวสุด
ท้าย
            X = True
            Exit For
          ElseIf I = Ann1.DTable.Rows - 1 Then
            MsgBox "กำหนดค่าของช่วงเวลาสุดท้ายใหม่",
, "ตรวจสอบดูอีกครั้ง"
            StopTime.SetFocus
          End If
        Next I
    End If

    If X Then
    ' ส่งค่าเขียนกราฟ โดยมีค่า StartR คือตำแหน่งแถวของ
ข้อมูล และต้องเลือกชนิดกราฟก่อน
        A = StartR
        StartLine = StartR ' ส่งค่าไปให้กับปุ่ม Quit เพื่อใช้
ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของ Summary
        B = StopR
        StopLine = StopR    ' ส่งค่าไปให้ปุ่ม Quit ในการ
คำนวณค่าเฉลี่ยของ Summary
        Graph1.GraphType = TypeGraph%
        'Graph2.GraphType = TypeGraph%
        Graph1.DataReset = 9 ' Clear All Data
        'Graph2.DataReset = 9
        Graph1.YAxisStyle = 1 ' ให้เลือก Scale อัตโนมัติ
        'Graph2.YAxisStyle = 1
        Graph1.BottomTitle = "Time(second)"
        'Graph2.BottomTitle = "Time(second)"

          Graph1.NumSets = 1
        '  Graph2.NumSets = 1
          Graph1.NumPoints = B - A + 1
        '  Graph2.NumPoints = B - A + 1
          Graph1.ThisSet = 1
        ' Graph2.ThisSet = 1
          Graph1.GraphTitle = "Graph Show Transient
Voltage"
          'Graph2.GraphTitle = "Graph Show
Transient Voltage"
          Graph1.LeftTitle = "Voltage"
          'Graph2.LeftTitle = "Voltage"
          PlotData "Transient Voltage", 2, A, B

    End If
End Sub


Private Sub Form_Load()
    PlotCommand_Click
    PrintForm
    AnnGraph.Show
    Printgraphf.Hide
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form AnnIntro1
   BorderStyle    =  0  'None
   Caption        =  "Introduction of Digitizer"
   ClientHeight   =  6330
   ClientLeft     =  1125
   ClientTop      =  1515
   ClientWidth    =  9600
   Height         =  6735
   Left           =  1065
   LinkTopic      =  "Form2"
   MousePointer   =  2  'Cross
   Picture        =  "ANNINTRO.frx":0000
   ScaleHeight    =  6330
   ScaleWidth     =  9600
   ShowInTaskbar  =  0  'False
   Top            =  1170
   Width          =  9720
   Begin VB.Timer Timer1
      Interval       =  5000
      Left           =  8760
      Top            =  5400
   End
   Begin VB.Label Label5
      BackStyle      =  0  'Transparent
      BorderStyle    =  1  'Fixed Single
      Height         =  4230
      Left           =  1335
      TabIndex       =  4
      Top            =  1020
      Width          =  7110
   End
   Begin VB.Label Label2
      Alignment      =  2  'Center
      BackStyle      =  0  'Transparent
      Caption        =  "Digitizer"
      BeginProperty Font
         name           =  "Modern"
         charset        =  1
         weight         =  700
         size           =  33.75
         underline      =  0  'False
         italic         =  0  'False
         strikethrough  =  0  'False
      EndProperty
      ForeColor      =  &H00C00000&
      Height         =  735
      Left           =  3570
      TabIndex       =  1
      Top            =  3630
      Width          =  2535
   End
   Begin VB.Label Label1
      Alignment      =  2  'Center
      BackStyle      =  0  'Transparent
      Caption        =  "Transient  Signal"
      BeginProperty Font
         name           =  "Times New Roman"
         charset        =  1
         weight         =  400
         size           =  33.75
         underline      =  0  'False
         italic         =  -1  'True
         strikethrough  =  0  'False
      EndProperty
      ForeColor      =  &H000040C0&
      Height         =  735
      Left           =  2565
      TabIndex       =  0
      Top            =  1485
      Width          =  4815
   End
   Begin VB.Label Label3
      BackStyle      =  0  'Transparent
      BorderStyle    =  1  'Fixed Single
      Height         =  6330
      Left           =  0
      TabIndex       =  2
      Top            =  0
      Width          =  9600
   End
   Begin VB.Label Label4
      BackStyle      =  0  'Transparent
      Caption        =  "Transient  Signal"
      BeginProperty Font
         name           =  "Times New Roman"
         charset        =  1
         weight         =  400
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        size            =   33.75
        underline       =   0   'False
        italic          =   -1  'True
        strikethrough   =   0   'False
      EndProperty
      ForeColor       =   &H00000040&
      Height          =   855
      Left            =   2640
      TabIndex        =   3
      Top             =   1485
      Width           =   4995
   End
End
Attribute VB_Name = "AnnIntro1"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub Timer1_Timer()
    Timer1.Enabled = False
   Unload Me
  ' Ann2.Visible = True

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Form2
   Caption        =   "Form2"
   ClientHeight   =   6075
   ClientLeft     =   1095
   ClientTop      =   1515
   ClientWidth    =   6720
   Height         =   6480
   Left           =   1035
   LinkTopic      =   "Form2"
   ScaleHeight    =   6075
   ScaleWidth     =   6720
   Top            =   1170
   Width          =   6840
End
Attribute VB_Name = "Form2"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        org   00h
        ljmp  main

        org   100h

;******begin define part******
bcomnd  equ   40h   ;command buffer 40h-
4Fh
ecomnd  equ   4Fh

; character define
eos   equ   10h
cr    equ   0Dh
lf    equ   0Ah
bs    equ   08h

;******end define part******

main:       mov   sp,#50h
        mov   scon,#52h
        mov   tmod,#20h
        mov   th1,#0FDh
        setb  tr1

        mov   dptr,#title
        call  sendstr
command:    call  get_comnd
        call  ck_comnd
        jb    20h,command   ;c=1 when
no command
        call  address
        jmp   @a+dptr
bexcuse:    acall send_data
        ajmp  command
        acall plot_tran
        ajmp  command
        acall hexload
        ajmp  command
        acall command3
        ajmp  command
        acall command4
        ajmp  command

hexload:    acall capture
        clr   21h         ;0 = frame1 tran,1
= fram2 tran
        mov   psw,#018h   ;register
bank1
hexload1:   mov   r0,#00h     ;clr data
counter
        mov   r1,#00h
        call  spc_ky
        call  n_line
        call  data_tran   ;transfer frame
        call  eof_tran    ;transfer end-of-
file
        call  n_line
        clr   p3.4
        call  delay
        setb  p3.4
        cpl   21h
        jb    21h,hexload1
        ret

eof_tran:   mov   dptr,#last_tab
tran1:      clr   a
        movc  a,@a+dptr
        cjne  a,#eos,tran2
        ret
tran2:      call  send
        inc   dptr
        sjmp  tran1

last_tab:   db    ':',30h,30h,30
h,30h,30h,30h,30h,31h,46h,46h,eos

data_tran:  mov   a,#':'      ;send :
        call  send
        mov   r7,#010h    ;data / 1line
counter
        mov   r6,#00h     ;byte checksum
        mov   a,r7        ;send number of
byte
        call  adder
        call  send_byte
        mov   a,r1        ;send the
begining address
        call  adder
        call  send_byte
        mov   a,r0
        call  adder
        call  send_byte
        clr   a           ;send data record 00
h
        call  send_byte
data_mov:   mov   a,p1
        anl   a,#00111111b
        call  adder
        call  send_byte
        setb  p3.7
        clr   p3.7
        djnz  r7,data_mov
        call  checksum    ;send checksum
byte
        call  send_byte
        call  n_line      ;start next line
        mov   a,r0
        add   a,#10h
        mov   r0,a
        mov   a,r1
        addc  a,#00h
        mov   r1,a
no_c:       jnc   data_tran
        ret
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
checksum:    mov    a,r6
             cpl    a
             inc    a
             ret

adder:       mov    30h,a
             add    a,r6
             mov    r6,a
             mov    a,30h
             ret

delay:       mov    r7,#02h
d3:          mov    r6,#200d
d2:          mov    r5,#0ffh
d1:          djnz   r5,d1
             djnz   r6,d2
             djnz   r7,d3
             ret

address:     mov    b,#04h
             mul    ab
             mov    dptr,#bexcuse
             call   combindadd
             ret

combindadd:  push   acc
             mov    a,b
             add    a,dph
             mov    dph,a
             pop    acc
             ret

;check command buffer return to order
;one character command
ck_comnd:    mov    r0,#00h
             mov    dptr,#comndtable
ck_comnd1:   clr    a
             movc   a,@a+dptr
             cjne   a,#eos,ck_comnd2
             setb   20h
             call   nocomnd
             ret
ck_comnd2:   inc    r0
             inc    dptr
             cjne   a,bcomnd,ck_comnd1
             dec    r0
             mov    a,r0
             clr    20h
             subb   a,#03h              ;numbe of
command
             jc     ck_comnd3
             ret
ck_comnd3:   mov    a,r0
             ret

comndtable:  db     'dphDPH',eos
nocommand:   db     cr,lf
             db     'NO COMMAND
DETECT',cr,lf,eos

;command undetectable
nocomnd:     mov    dptr,#nocommand
             call   sendstr
             ret

;monitor check send key
keyck:       cjne   a,#bs,keyck1
             setb   20h
             ret
keyck1:      cjne   a,#0Bh,keyck2
             setb   20h
             ret
keyck2:      clr    20h
             ret

;receive character to buffer command
;internal ram 40h-4Fh
get_comnd:   call   prompt
             mov    r0,#bcomnd
get_comnd1:  call   get
             call   keyck
             jb     20h,get_comnd2      ;jump to
spacial key
             call   normal_key          ;not jump
is normal key
             cjne   a,#cr,get_comnd1    ;go to
receive key until #cr
             call   n_line
             ret
get_comnd2:  clr    20h
             call   spacial_key
             sjmp   get_comnd1

;special key receive
spacial_key: cjne   a,#bs,spacial_key2
             cjne   r0,#bcomnd,spacial_key1
             ret
spacial_key1: dec   r0
             call   send_bs
spacial_key2: ret

;noraml key receive
normal_key:  cjne
r0,#ecomnd+1,normal_key1
             push   acc
             dec    r0
             call   send_bs
             call   sound
             pop    acc
normal_key1: mov    @r0,a
             call   send
             inc    r0
             ret

;capture
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
capture:    clr   p3.4        ;turn on led
            clr   p3.5        ;clr counter
            setb  p3.5        ;start convert

            jnb   p3.2,$      ;wait to convert
            setb  p3.4        ;turn off led
            ret

;set of excuse
send_data:  call  capture
            mov   r2,#00h
send_data1: call  spc_ky
            call  n_line
            mov   r6,#00h
send_data3: mov   r7,#00h
line_send:  push  psw
            mov   psw,#18h
            mov   a,p1
            anl   a,#00111111b

            mov   r7,#06h
            call  bcd_con
            call  data_send

            pop   psw
            setb  p3.7
            clr   p3.7
            inc   r7
            cjne  r7,#10h,line_send
            call  n_line

            inc   r6
            cjne  r6,#20h,send_data3
            mov   a,#':'
            call  send
            inc   r2
            cjne  r2,#0Ah,send_data1
            ret

data_send:  ; mov   a,r6
            ; call  send_byte
            mov   a,r5        ;send low byte
            call  send_byte
            ret

spc_ky:     call  get
            cjne  a,#' ',spc_ky
            ret

plot_tran:  call  capture
            mov   psw,#018h   ;register
bank1
            call  spc_ky
            call  n_line

            mov   r0,#00h     ;cler send
number
get_data:   mov   a,p1
            anl   a,#00111111b

            mov   r7,#06h     ;select shift
count = 6
            call  bcd_con     ;convert to BCD
            mov   31h,r5      ;move to data
buffer
            mov   32h,r6

            mov   r7,#08h     ;select shift
count = 8
            mov   a,r0
            call  bcd_con
            mov   33h,r5      ; move to
number buffer
            mov   34h,r6

            call  send_form
            setb  p3.7
            clr   p3.7
            inc   r0
            cjne  r0,#00h,get_data

            call  n_line
            mov   psw,#00h

            ret

tab_bcd:    db 01h,00h,02h,00
h,04h,00h,08h,00h,16h,00h,32
h,00h,64h,00h,28h,01h,56h,02h

;convert hex to bcd
bcd_con:    mov   r5,#00h     ;clr register
            mov   r6,#00h
            mov   dptr,#tab_bcd
            clr   c
shift:      rrc   a
            jc    addbcd
            inc   dptr
            inc   dptr
            djnz  r7,shift
            ret

addbcd:     push  acc
            clr   c
            clr   a
            movc  a,@a+dptr
            add   a,r5
            da    a
            mov   r5,a
            inc   dptr
            clr   a
            movc  a,@a+dptr
            addc  a,r6
            da    a
            mov   r6,a
            inc   dptr
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        setb   c
        pop    acc
        djnz   r7,shift
        ret

;send format number(BCD),data(DCB)
send_form:   mov    a,34h
        call   send_byte
        mov    a,33h
        call   send_byte
        mov    a,#','
        call   send
        mov    a,32h
        call   send_byte
        mov    a,31h
        call   send_byte
        call   n_line
        ret

send_byte:   call   bytebin_as
        mov    a,r4
        call   send
        mov    a,r3
        call   send
        ret


command1:    mov    dptr,#com1
        call   sendstr
        ret

command2:    mov    dptr,#com2
        call   sendstr
        ret

command3:    mov    dptr,#com3
        call   sendstr
        ret

command4:    mov    dptr,#com4
        call   sendstr
        ret

com1:       db     cr,lf,'command1
excuse',cr,lf,eos
com2:       db     cr,lf,'command2
excuse',cr,lf,eos
com3:       db     cr,lf,'command3
excuse',cr,lf,eos
com4:       db     cr,lf,'command4
excuse',cr,lf,eos


;dislay buffer(unuse)
disp:       call   n_line
        mov    r0,#bcomnd
disp1:      mov    a,@r0
        call   send
        inc    r0
        cjne   r0,#ecomnd+1,disp1
        call   n_line
        ret


;send back space key
send_bs:    mov    a,#bs
        call   send
        mov    a,#' '
        call   send
        mov    a,#bs
        call   send
        ret

;send sound
sound:      mov    a,#07h
        call   send
        ret

;prompt send
prompt:     mov    a,#'>'
        call   send
        ret

;binary to ascii converter
bin_ascii:   anl    a,#0Fh
        mov    r2,a
        clr    c
        subb   a,#0Ah
        mov    a,r2
        jnc    bin_ascii1
        add    a,#30h
        ret
bin_ascii1:  add    a,#37h
        ret

;byte of binary to ascii converter
bytebin_as:  mov    b,a
        call   bin_ascii
        mov    r3,a
        mov    a,b
        swap   a
        call   bin_ascii
        mov    r4,a
        ret

;new line present
n_line:     mov    a,#cr
        call   send
        mov    a,#lf
        call   send
        ret

;send one charactor
;     used: a     send charactor
send:       jnb    ti,$
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            clr    ti
            mov    sbuf,a
            ret

;receive one charactor
;      used:  a      receive charactor
get:          jnb    ri,$
            clr    ri
            mov    a,sbuf
            ret

;send string until send eos(end of string)
;      entry:  dptr    the begining of string
;      used:  a       get charactor to send
sendstr:       clr    a
            movc   a,@a+dptr
            cjne   a,#eos,sendstr1
            ret
sendstr1:      call   send
            inc    dptr
            sjmp   sendstr

title:         db     cr,lf
            db     'TRANSIENT SIGNAL
DIGITIZER',cr,lf
            db     ' (TSD|Software Control I)',
cr,lf
            db     'APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT',cr,lf
            db     '      KMIT',27h,'L 1997 ',cr,lf
            db     cr,lf,eos

            end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- Compatible with MCS-51™ Products
- 2 Kbytes of Reprogrammable Flash Memory
  - Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 2.7 V to 6 V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Two-Level Program Memory Lock
- 128 x 8-Bit Internal RAM
- 15 Programmable I/O Lines
- Two 16-Bit Timer/Counters
- Six Interrupt Sources
- Programmable Serial UART Channel
- Direct LED Drive Outputs
- On-Chip Analog Comparator
- Low Power Idle and Power Down Modes

8-Bit Microcontroller with 2 Kbytes Flash

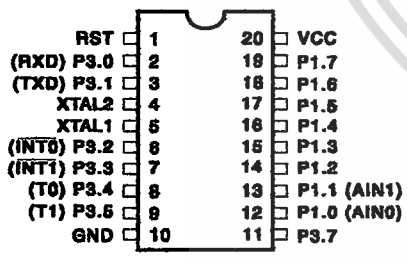
Description

The AT89C2051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 2 Kbytes of Flash programmable and erasable read only memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry standard MCS-51™ instruction set and pinout. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C2051 is a powerful microcomputer which provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The AT89C2051 provides the following standard features: 2 Kbytes of Flash, 128 bytes of RAM, 15 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C2051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The Power Down Mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

Pin Configuration

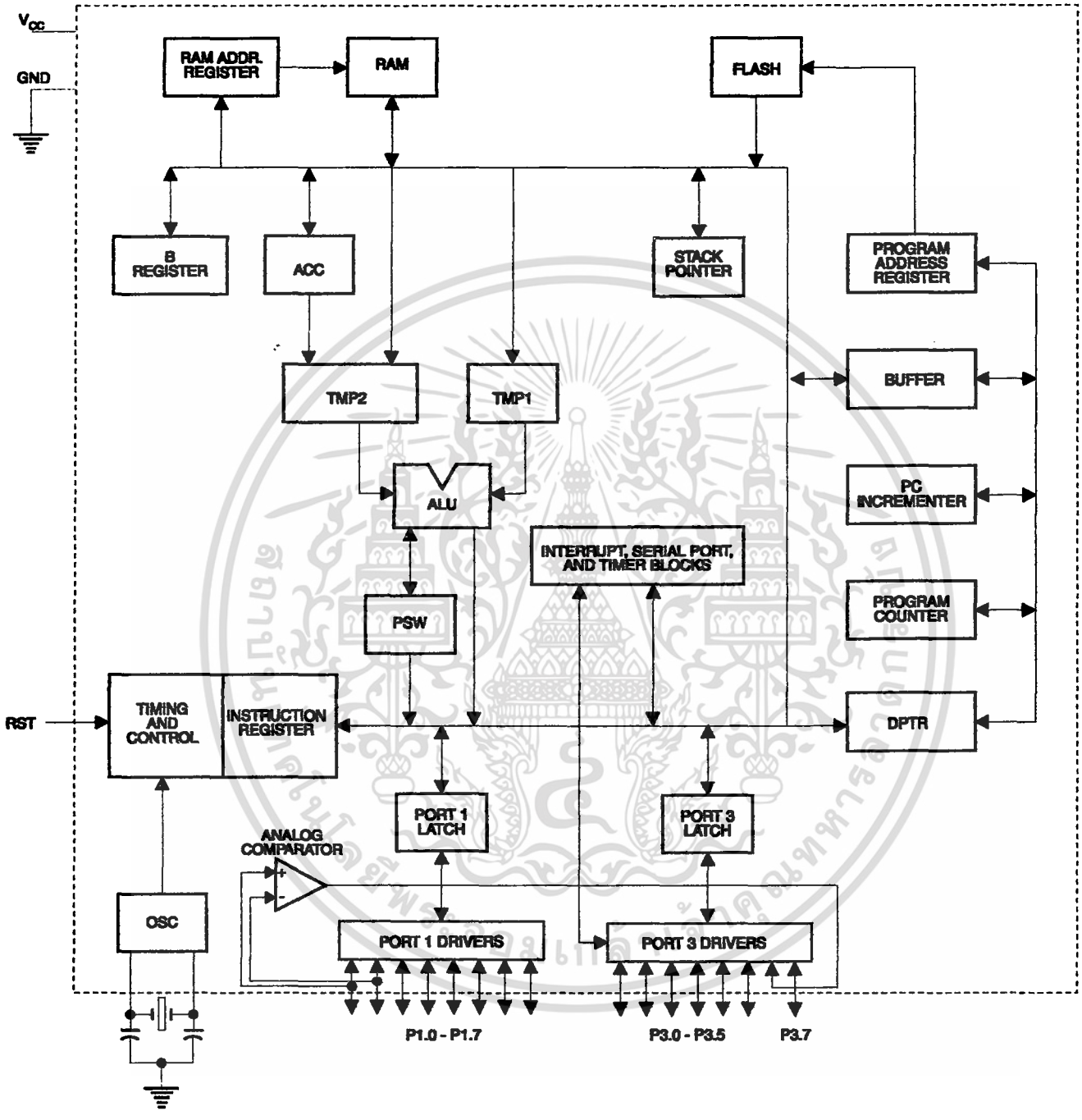
PDIP/SOIC



0368C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin Description

Vcc

Supply voltage.

GND

Ground.

Port 1

Port 1 is an 8-bit bidirectional I/O port. Port pins P1.2 to P1.7 provide internal pullups. P1.0 and P1.1 require external pullups. P1.0 and P1.1 also serve as the positive input (AIN0) and the negative input (AIN1), respectively, of the on-chip precision analog comparator. The Port 1 output buffers can sink 20 mA and can drive LED displays directly. When 1s are written to Port 1 pins, they can be used as inputs. When pins P1.2 to P1.7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 1 also receives code data during Flash programming and program verification.

Port 3

Port 3 pins P3.0 to P3.5, P3.7 are seven bidirectional I/O pins with internal pullups. P3.6 is hard-wired as an input to the output of the on-chip comparator and is not accessible as a general purpose I/O pin. The Port 3 output buffers can sink 20 mA. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as inputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C2051 as listed below:

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	$\overline{INT0}$ (external interrupt 0)
P3.3	$\overline{INT1}$ (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and programming verification.

RST

Reset input. All I/O pins are reset to 1s as soon as RST goes high. Holding the RST pin high for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

Each machine cycle takes 12 oscillator or clock cycles.

XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

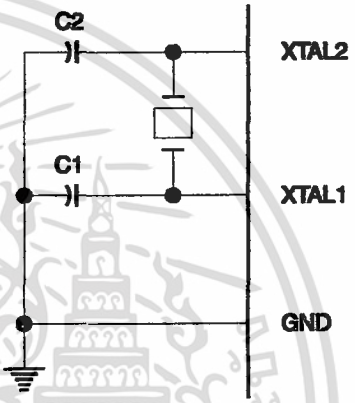
XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

Oscillator Characteristics

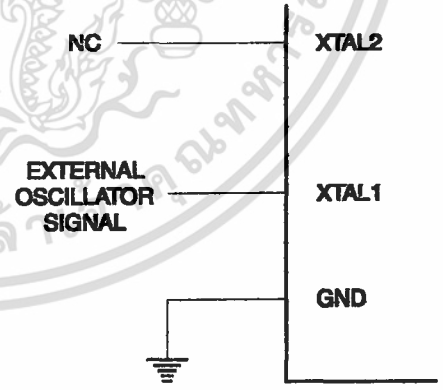
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Figure 1. Oscillator Connections



Notes: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Function Registers

A map of the on-chip memory area called the Special Function Register (SFR) space is shown in the table below.

Note that not all of the addresses are occupied, and unoccupied addresses may not be implemented on the chip. Read accesses to these addresses will in general return random data, and write accesses will have an indeterminate effect.

User software should not write 1s to these unlisted locations, since they may be used in future products to invoke new features. In that case, the reset or inactive values of the new bits will always be 0.

Table 1. AT89C2051 SFR Map and Reset Values

0F8H								0FFH
0F0H	B 00000000							0F7H
0E8H								0EFH
0E0H	ACC 00000000							0E7H
0D8H								0DFH
0D0H	PSW 00000000							0D7H
0C8H								0CFH
0C0H								0C7H
0B8H	IP XXX00000							0BFH
0B0H	P3 11111111							0B7H
0A8H	IE 0XX00000							0AFH
0A0H								0A7H
98H	SCON 00000000	SBUF XXXXXXXX						9FH
90H	P1 11111111							97H
88H	TCON 00000000	TMOD 00000000	TL0 00000000	TL1 00000000	TH0 00000000	TH1 00000000		8FH
80H		SP 00000111	DPL 00000000	DPH 00000000				PCON 0XXX0000 87H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Restrictions on Certain Instructions

The AT89C2051 and is an economical and cost-effective member of Atmel's growing family of microcontrollers. It contains 2 Kbytes of flash program memory. It is fully compatible with the MCS-51 architecture, and can be programmed using the MCS-51 instruction set. However, there are a few considerations one must keep in mind when utilizing certain instructions to program this device.

All the instructions related to jumping or branching should be restricted such that the destination address falls within the physical program memory space of the device, which is 2K for the AT89C2051. This should be the responsibility of the software programmer. For example, LJMP 7E0H would be a valid instruction for the AT89C2051 (with 2K of memory), whereas LJMP 900H would not.

1. Branching instructions:

LCALL, LJMP, ACALL, AJMP, SJMP, JMP @A+DPTR

These unconditional branching instructions will execute correctly as long as the programmer keeps in mind that the destination branching address must fall within the physical boundaries of the program memory size (locations 00H to 7FFH for the 89C2051). Violating the physical space limits may cause unknown program behavior.

CJNE [...], DJNZ [...], JB, JNB, JC, JNC, JBC, JZ, JNZ
With these conditional branching instructions the same rule above applies. Again, violating the memory boundaries may cause erratic execution.

For applications involving interrupts the normal interrupt service routine address locations of the 80C51 family architecture have been preserved.

2. MOVX-related instructions, Data Memory:

The AT89C2051 contains 128 bytes of internal data memory. Thus, in the AT89C2051 the stack depth is limited to 128 bytes, the amount of available RAM. External DATA memory access is not supported in this device, nor is external PROGRAM memory execution. Therefore, no MOVX [...] instructions should be included in the program.

A typical 80C51 assembler will still assemble instructions, even if they are written in violation of the restrictions mentioned above. It is the responsibility of the controller user to know the physical features and limitations of the device being used and adjust the instructions used correspondingly.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Program Memory Lock Bits

On the chip are two lock bits which can be left unprogrammed (U) or can be programmed (P) to obtain the additional features listed in the table below:

Lock Bit Protection Modes[1]

Program Lock Bits			
	LB1	LB2	Protection Type
1	U	U	No program lock features.
2	P	U	Further programming of the Flash is disabled.
3	P	P	Same as mode 2, also verify is disabled.

Note: 1. The Lock Bits can only be erased with the Chip Erase operation

Idle Mode

In idle mode, the CPU puts itself to sleep while all the on-chip peripherals remain active. The mode is invoked by software. The content of the on-chip RAM and all the special functions registers remain unchanged during this mode. The idle mode can be terminated by any enabled interrupt or by a hardware reset.

P1.0 and P1.1 should be set to '0' if no external pullups are used, or set to '1' if external pullups are used.

It should be noted that when idle is terminated by a hardware reset, the device normally resumes program execution, from where it left off, up to two machine cycles before the internal reset algorithm takes control. On-chip hardware inhibits access to internal RAM in this event, but access to the port pins is not inhibited. To eliminate the possibility of an unexpected write to a port pin when Idle is terminated by reset, the instruction following the one that invokes Idle should not be one that writes to a port pin or to external memory.

Power Down Mode

In the power down mode the oscillator is stopped, and the instruction that invokes power down is the last instruction executed. The on-chip RAM and Special Function Registers retain their values until the power down mode is terminated. The only exit from power down is a hardware reset. Reset redefines the SFRs but does not change the on-chip RAM. The reset should not be activated before V_{CC} is restored to its normal operating level and must be held active long enough to allow the oscillator to restart and stabilize.

P1.0 and P1.1 should be set to '0' if no external pullups are used, or set to '1' if external pullups are used.

Programming The Flash

The AT89C2051 is shipped with the 2 Kbytes of on-chip PEROM code memory array in the erased state (i.e., contents = FFH) and ready to be programmed. The code memory array is programmed one byte at a time. *Once the array is programmed, to re-program any non-blank byte, the entire memory array needs to be erased electrically.*

Internal Address Counter: The AT89C2051 contains an internal PEROM address counter which is always reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by applying a positive going pulse to pin XTAL1.

Programming Algorithm: To program the AT89C2051, the following sequence is recommended.

1. Power-up sequence:
   Apply power between V_{CC} and GND pins
   Set RST and XTAL1 to GND
   With all other pins floating, wait for greater than 10 milliseconds
2. Set pin RST to 'H'
   Set pin P3.2 to 'H'
3. Apply the appropriate combination of 'H' or 'L' logic levels to pins P3.3, P3.4, P3.5, P3.7 to select one of the programming operations shown in the PEROM Programming Modes table.

To Program and Verify the Array:

4. Apply data for Code byte at location 000H to P1.0 to P1.7.
5. Raise RST to 12V to enable programming.
6. Pulse P3.2 once to program a byte in the PEROM array or the lock bits. The byte-write cycle is self-timed and typically takes 1.2 ms.
7. To verify the programmed data, lower RST from 12V to logic 'H' level and set pins P3.3 to P3.7 to the appropiate levels. Output data can be read at the port P1 pins.
8. To program a byte at the next address location, pulse XTAL1 pin once to advance the internal address counter. Apply new data to the port P1 pins.
9. Repeat steps 5 through 8, changing data and advancing the address counter for the entire 2 Kbytes array or until the end of the object file is reached.
10. Power-off sequence:
    set XTAL1 to 'L'
    set RST to 'L'
    Float all other I/O pins
    Turn V_{CC} power off

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\overline{\text{Data}}$ Polling: The AT89C2051 features $\overline{\text{Data}}$ Polling to indicate the end of a write cycle. During a write cycle, an attempted read of the last byte written will result in the complement of the written data on P1.7. Once the write cycle has been completed, true data is valid on all outputs, and the next cycle may begin. $\overline{\text{Data}}$ Polling may begin any time after a write cycle has been initiated.

Ready/$\overline{\text{Busy}}$: The Progress of byte programming can also be monitored by the RDY/$\overline{\text{BSY}}$ output signal. Pin P3.1 is pulled low after P3.2 goes High during programming to indicate BUSY. P3.1 is pulled High again when programming is done to indicate READY.

Program Verify: If lock bits LB1 and LB2 have not been programmed code data can be read back via the data lines for verification:

1. Reset the internal address counter to 000H by bringing RST from 'L' to 'H'.
2. Apply the appropriate control signals for Read Code data and read the output data at the port P1 pins.
3. Pulse pin XTAL1 once to advance the internal address counter.
4. Read the next code data byte at the port P1 pins.
5. Repeat steps 3 and 4 until the entire array is read.

The lock bits cannot be verified directly. Verification of the lock bits is achieved by observing that their features are enabled.

Chip Erase: The entire PEROM array (2 Kbytes) and the two Lock Bits are erased electrically by using the proper combination of control signals and by holding P3.2 low for 10 ms. The code array is written with all "1"s in the Chip Erase operation and must be executed before any non-blank memory byte can be re-programmed.

Reading the Signature Bytes: The signature bytes are read by the same procedure as a normal verification of locations 000H, 001H, and 002H, except that P3.5 and P3.7 must be pulled to a logic low. The values returned are as follows.

(000H) = 1EH indicates manufactured by Atmel
(001H) = 21H indicates 89C2051

Programming Interface

Every code byte in the Flash array can be written and the entire array can be erased by using the appropriate combination of control signals. The write operation cycle is self-timed and once initiated, will automatically time itself to completion.

All major programming vendors offer worldwide support for the Atmel microcontroller series. Please contact your local programming vendor for the appropriate software revision.

Flash Programming Modes

Mode		RST	P3.2/$\overline{\text{PROG}}$	P3.3	P3.4	P3.5	P3.7
Write Code Data[1,3]		12V	⎍	L	H	H	H
Read Code Data[1]		H	H	L	L	H	H
Write Lock	Bit - 1	12V	⎍	H	H	H	H
	Bit - 2	12V	⎍	H	H	L	L
Chip Erase		12V	⎍[2]	H	L	L	L
Read Signature Byte		H	H	L	L	L	L

Notes: 1. The internal PEROM address counter is reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by a positive pulse at XTAL1 pin.
2. Chip Erase requires a 10 ms $\overline{\text{PROG}}$ pulse.
3. P3.1 is pulled Low during programming to indicate RDY/$\overline{\text{BSY}}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3. Programming the Flash Memory

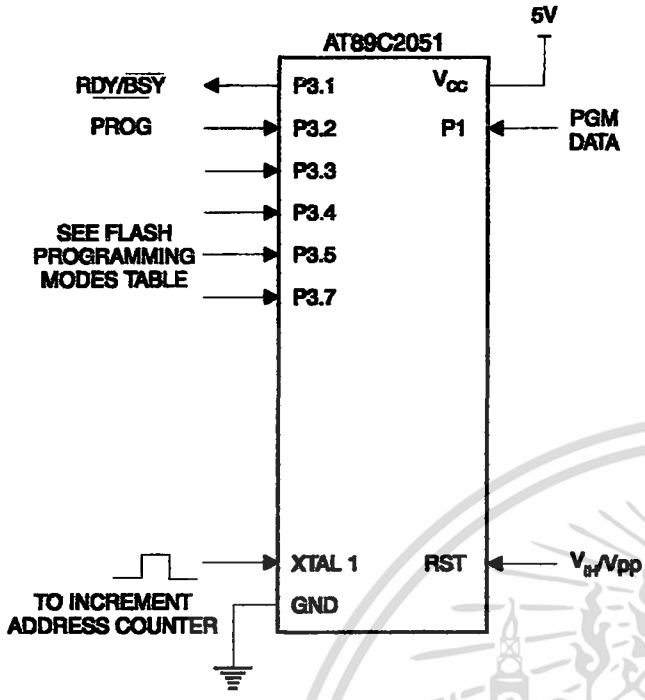
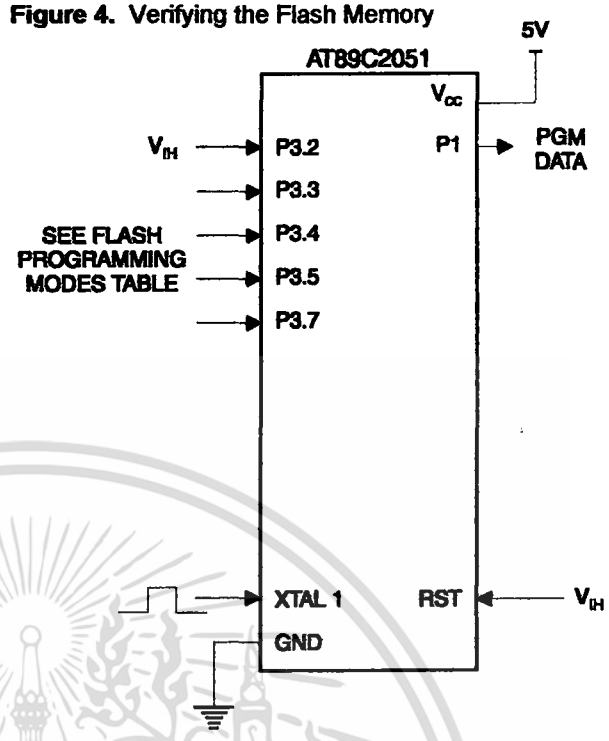


Figure 4. Verifying the Flash Memory



Flash Programming and Verification Characteristics

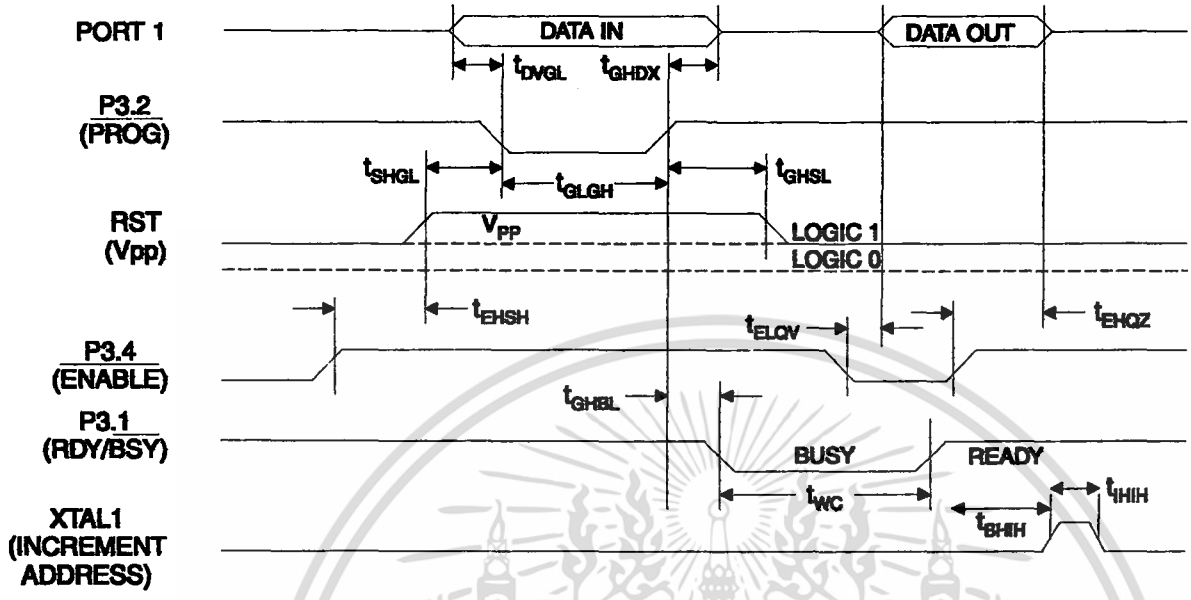
T_A = 21°C to 27°C, V_{CC} = 5.0 ± 10%

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
V_{PP}	Programming Enable Voltage	11.5	12.5	V
I_{PP}	Programming Enable Current		250	µA
t_{DVGL}	Data Setup to $\overline{PROG}$ Low	1.0		µs
t_{GHDX}	Data Hold After $\overline{PROG}$	1.0		µs
t_{EHSH}	P3.4 ($\overline{ENABLE}$) High to V_{PP}	1.0		µs
t_{SHGL}	V_{PP} Setup to $\overline{PROG}$ Low	10		µs
t_{GHSL}	V_{PP} Hold After $\overline{PROG}$	10		µs
t_{GLGH}	$\overline{PROG}$ Width	1	110	µs
t_{ELQV}	$\overline{ENABLE}$ Low to Data Valid		1.0	µs
t_{EHQZ}	Data Float After $\overline{ENABLE}$	0	1.0	µs
t_{GHBL}	$\overline{PROG}$ High to $\overline{BUSY}$ Low		50	ns
t_{WC}	Byte Write Cycle Time		2.0	ms
t_{BHIH}	RDY/$\overline{BSY}$\ to Increment Clock Delay	1.0		µs
t_{IHIL}	Increment Clock High	200		ns

Note: 1. Only used in 12-volt programming mode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flash Programming and Verification Waveforms



Absolute Maximum Ratings*

Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Voltage on Any Pin with Respect to Ground	-1.0 V to +7.0 V
Maximum Operating Voltage	6.6 V
DC Output Current	25.0 mA

*NOTICE: Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D.C. Characteristics

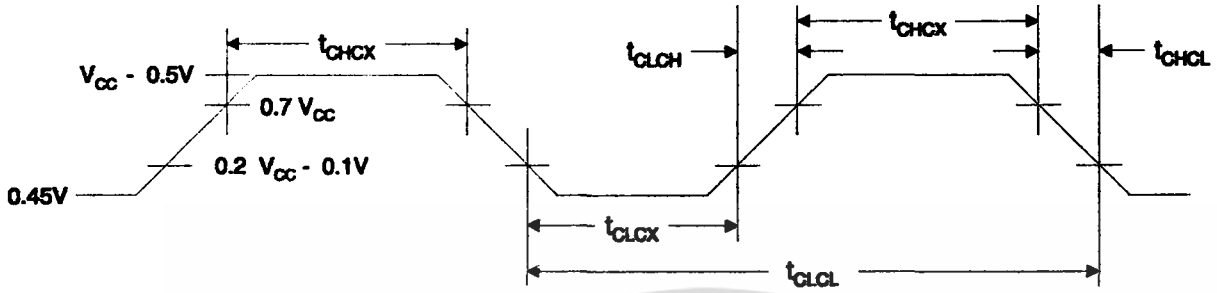
T_A = -40°C to 85°C, V_{CC} = 2.7 V to 6.0 V (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Max	Units
V_{IL}	Input Low Voltage		-0.5	0.2 V_{CC}-0.1	V
V_{IH}	Input High Voltage	(Except XTAL1, RST)	0.2 V_{CC}+0.9	V_{CC}+0.5	V
V_{IH1}	Input High Voltage	(XTAL1, RST)	0.7 V_{CC}	V_{CC}+0.5	V
V_{OL}	Output Low Voltage[1] (Ports 1, 3)	I_{OL} = 20 mA, V_{CC} = 5 V I_{OL} = 10 mA, V_{CC} = 2.7 V		0.5	V
V_{OH}	Output High Voltage (Ports 1, 3)	I_{OH} = -80 µA, V_{CC} = 5 V ± 10%	2.4		V
		I_{OH} = -30 µA	0.75 V_{CC}		V
		I_{OH} = -12 µA	0.9 V_{CC}		V
I_{IL}	Logical 0 Input Current (Ports 1, 2, 3)	V_{IN} = 0.45 V		-50	µA
I_{TL}	Logical 1 to 0 Transition Current (Ports 1, 2, 3)	V_{IN} = 2 V		-750	µA
I_{LI}	Input Leakage Current (Port P1.0, P1.1)	0 < V_{IN} < V_{CC}		±10	µA
V_{OS}	Comparator Input Offset Voltage	V_{CC} = 5 V		20	mV
V_{CM}	Comparator Input Common Mode Voltage		0	V_{CC}	V
RRST	Reset Pulldown Resistor		50	300	KΩ
C_{IO}	Pin Capacitance	Test Freq. = 1 MHz, T_A = 25°C		10	pF
I_{CC}	Power Supply Current	Active Mode, 12 MHz, V_{CC} = 6 V/3 V		15/5.5	mA
		Idle Mode, 12 MHz, V_{CC} = 6 V/3 V P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		5/1	mA
	Power Down Mode[2]	V_{CC} = 6 V P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		100	µA
		V_{CC} = 3 V P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		20	µA

Notes: 1. Under steady state (non-transient) conditions, I_{OL} must be externally limited as follows:
Maximum I_{OL} per port pin:20 mA
Maximum total IOL for all output pins:80 mA
If IOL exceeds the test condition, VOL may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to sink current greater than the listed test conditions.
2. Minimum V_{CC} for Power Down is 2 V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

External Clock Drive Waveforms



External Clock Drive

Symbol	Parameter	V_{CC} = 2.7 V to 6.0 V		V_{CC} = 4.0 V to 6.0 V		Units
		Min	Max	Min	Max	
$1/t_{CLCL}$	Oscillator Frequency	0	12	0	24	MHz
t_{CLCL}	Clock Period	83.3		41.6		ns
t_{CHCX}	High Time	30		15		ns
t_{CLCX}	Low Time	30		15		ns
t_{CLCH}	Rise Time		20		20	ns
t_{CHCL}	Fall Time		20		20	ns

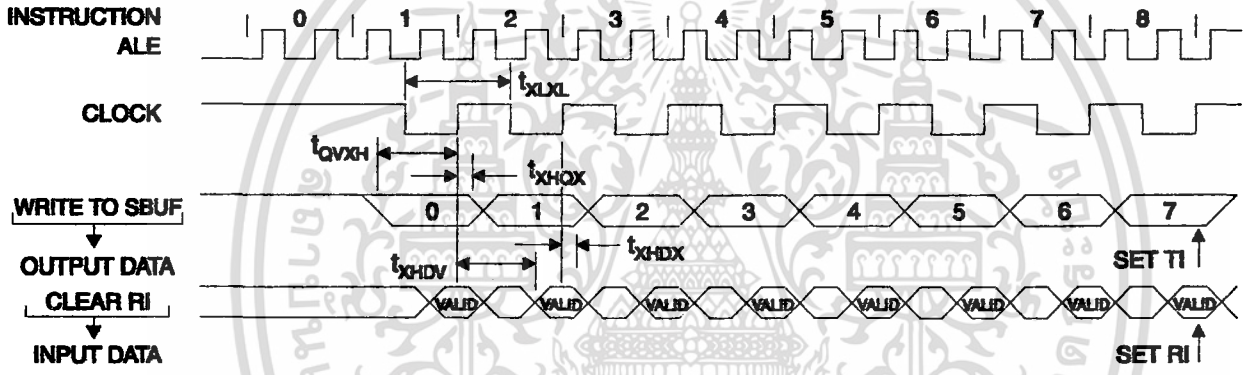
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Serial Port Timing: Shift Register Mode Test Conditions

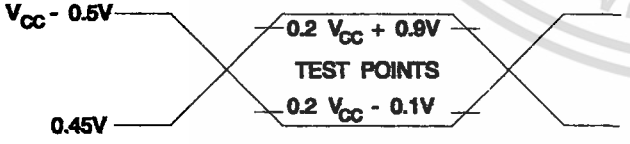
(V_{CC} = 5.0 V ± 20%; Load Capacitance = 80 pF)

Symbol	Parameter	12 MHz Osc		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
t_{XLXL}	Serial Port Clock Cycle Time	1.0		$12t_{CLCL}$		µs
t_{QVXH}	Output Data Setup to Clock Rising Edge	700		$10t_{CLCL}$-133		ns
t_{XHQX}	Output Data Hold After Clock Rising Edge	50		$2t_{CLCL}$-33		ns
t_{XHDX}	Input Data Hold After Clock Rising Edge	0		0		ns
t_{XHDV}	Clock Rising Edge to Input Data Valid		700		10tCLCL-133	ns

Shift Register Mode Timing Waveforms

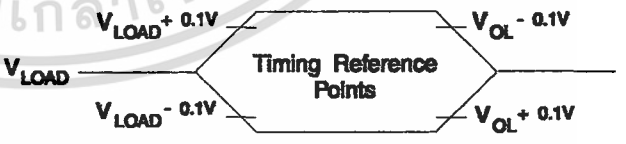


AC Testing Input/Output Waveforms[1]



Note: 1. AC Inputs during testing are driven at V_{CC} - 0.5 V for a logic 1 and 0.45 V for a logic 0. Timing measurements are made at V_{IH} min. for a logic 1 and V_{IL} max. for a logic 0.

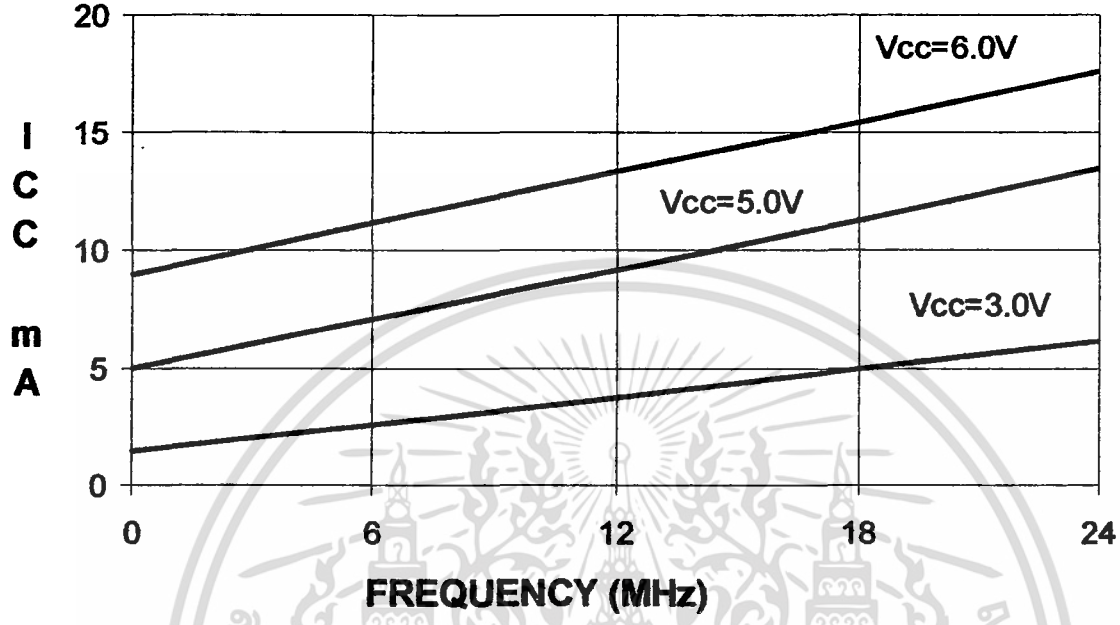
Float Waveforms[1]



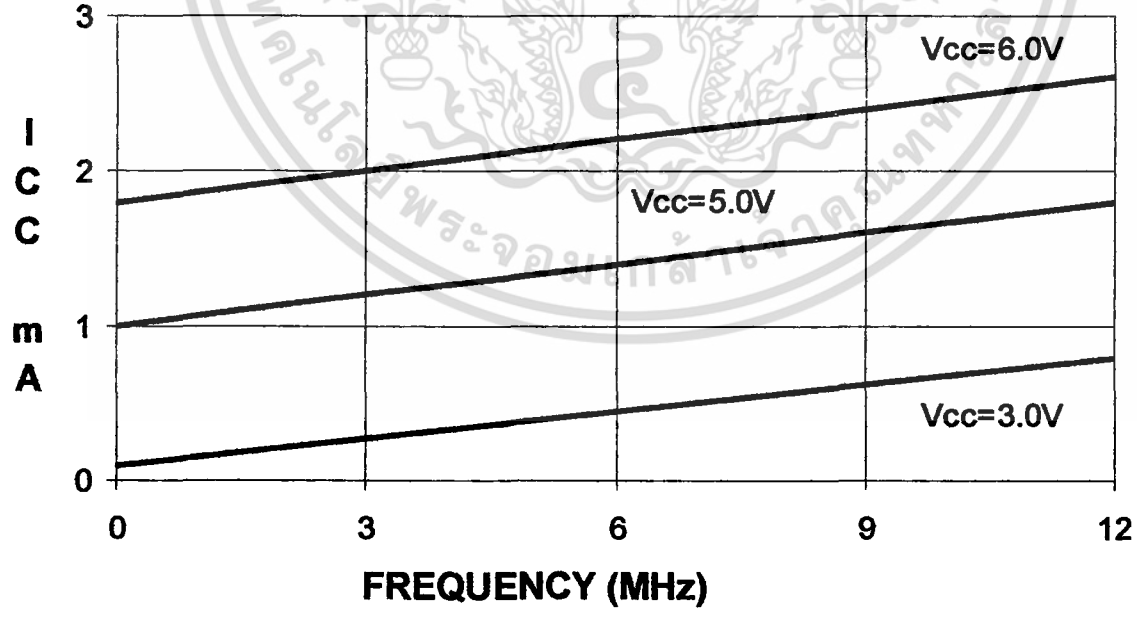
Note: 1. For timing purposes, a port pin is no longer floating when a 100 mV change from load voltage occurs. A port pin begins to float when a 100 mV change from the loaded V_{OH}/V_{OL} level occurs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AT89C2051
TYPICAL ICC - ACTIVE (85°C)

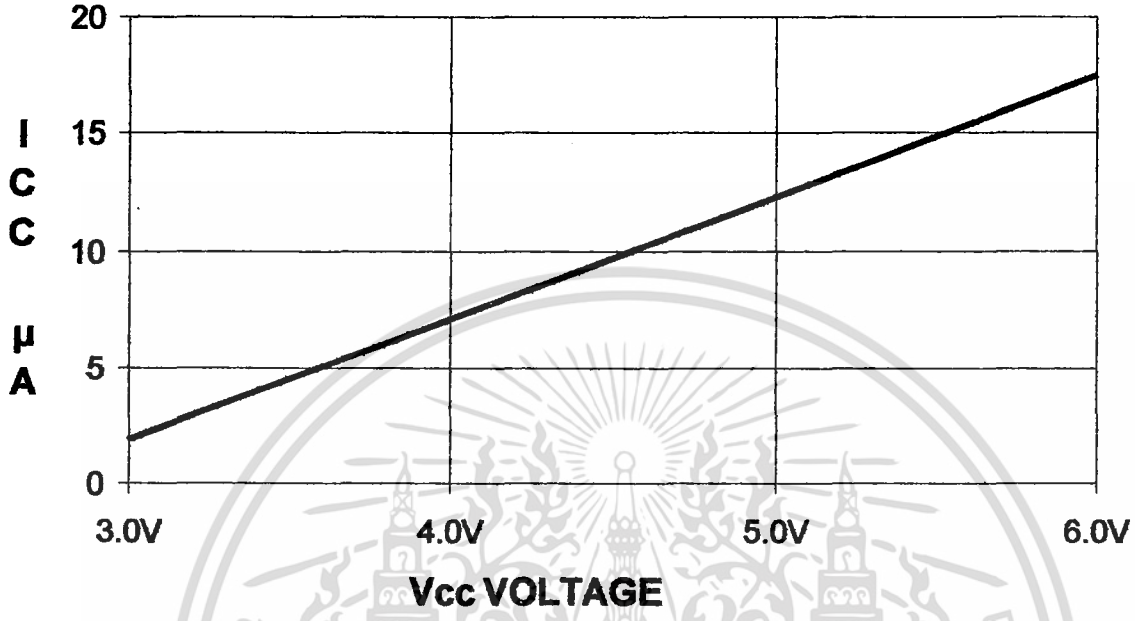


AT89C2051
TYPICAL ICC - IDLE (85°C)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL ICC vs. VOLTAGE- POWER DOWN (85°C)



Note: 1. XTAL1 tied to GND for I_{CC} (power down).
2. P.1.0 and P1.1 = V_{CC} or GND.
3. Lock bits programmed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ordering Information

Speed (MHz)	Power Supply	Ordering Code	Package	Operation Range
12	2.7 V to 6.0 V	AT89C2051-12PC AT89C2051-12SC	20P3 20S	Commercial (0°C to 70°C)
		AT89C2051-12PI AT89C2051-12SI	20P3 20S	Industrial (-40°C to 85°C)
24	4.0 V to 6.0 V	AT89C2051-24PC AT89C2051-24SC	20P3 20S	Commercial (0°C to 70°C)
		AT89C2051-24PI AT89C2051-24SI	20P3 20S	Industrial (-40°C to 85°C)

Package Type	
20P3	20 Lead, 0.300" Wide, Plastic Dual In-line Package (PDIP)
20S	20 Lead, 0.300" Wide, Plastic Gull Wing Small Outline (SOIC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HARRIS SEMICONDUCTOR

CA3306

CMOS Video Speed 6-Bit Flash A/D Converter

December 1993

Features

- CMOS Low Power with Video Speed (70mW Typ.)
- Parallel Conversion Technique
- Signal Power Supply Voltage (3V to 7.5V)
- 15MHz Sampling Rate with Single 5V Supply
- 6-Bit Latched Tri-State Output with Overflow Bit
- Pin-for-Pin Retrofit for the CA3300

Applications

- TV Video Digitizing
- Ultrasound Signature Analysis
- Transient Signal Analysis
- High Energy Physics Research
- High Speed Oscilloscope Storage/Display
- General Purpose Hybrid ADCs
- Optical Character Recognition
- Radar Pulse Analysis
- Motion Signature Analysis
- Robot Vision

Description

The CA3306 family are CMOS parallel (FLASH) analog-to-digital converters designed for applications demanding both low power consumption and high speed digitization. Digitizing at 15MHz, for example, requires only about 50mW.

The CA3306 family operates over a wide, full scale signal input voltage range of 1V up to the supply voltage. Power consumption is as low as 15mW, depending upon the clock frequency selected. The CA3306 types may be directly retrofitted into CA3300 sockets, offering improved linearity at a lower reference voltage and high operating speed with a 5V supply.

The intrinsic high conversion rate makes the CA3306 types ideally suited for digitizing high speed signals. The overflow bit makes possible the connection of two or more CA3306s in series to increase the resolution of the conversion system. A series connection of two CA3306s may be used to produce a 7-bit high speed converter. Operation of two CA3306s in parallel doubles the conversion speed (i.e., increases the sampling rate from 15MHz to 30MHz).

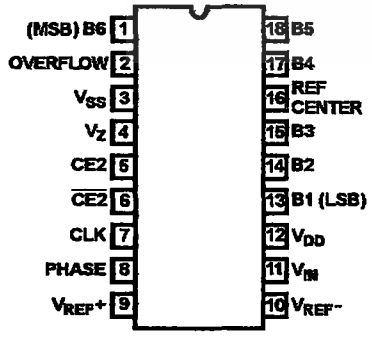
Sixty-four paralleled auto balanced comparators measure the input voltage with respect to a known reference to produce the parallel bit outputs in the CA3306. Sixty-three comparators are required to quantize all input voltage levels in this 6-bit converter, and the additional comparator is required for the overflow bit.

Ordering Information

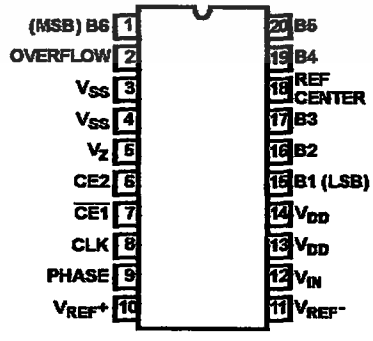
PART NUMBER	LINEARITY (INL, DNL)	SAMPLING RATE	TEMPERATURE RANGE	PACKAGE
CA3306E	±0.5 LSB	15MHz (67ns)	-40°C to +85°C	18 Lead Plastic DIP
CA3306AE	±0.25 LSB	15MHz (67ns)	-40°C to +85°C	18 Lead Plastic DIP
CA3306CE	±0.5 LSB	10MHz (100ns)	-40°C to +85°C	18 Lead Plastic DIP
CA3306M	±0.5 LSB	15MHz (67ns)	-40°C to +85°C	20 Lead Plastic SOIC
CA3306CM	±0.5 LSB	10MHz (100ns)	-40°C to +85°C	20 Lead Plastic SOIC
CA3306D	±0.5 LSB	15MHz (67ns)	-55°C to +125°C	18 Lead Ceramic DIP
CA3306AD	±0.25 LSB	15MHz (67ns)	-55°C to +125°C	18 Lead Ceramic DIP
CA3306CD	±0.5 LSB	10MHz (100ns)	-55°C to +125°C	18 Lead Ceramic DIP
CA3306J3	±0.5 LSB	15MHz (67ns)	-55°C to +125°C	20 Lead LCC
CA3306J3	±0.5 LSB	10MHz (100ns)	-55°C to +125°C	20 Lead LCC

Pinouts

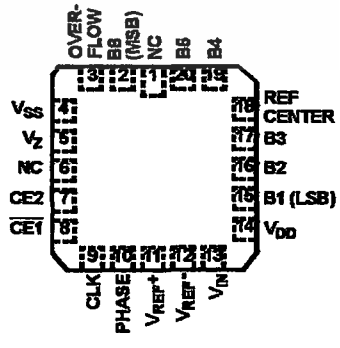
CA3306 (PDIP, CDIP)
TOP VIEW



CA3306 (SOIC)
TOP VIEW



CA3306 (LCC)
TOP VIEW



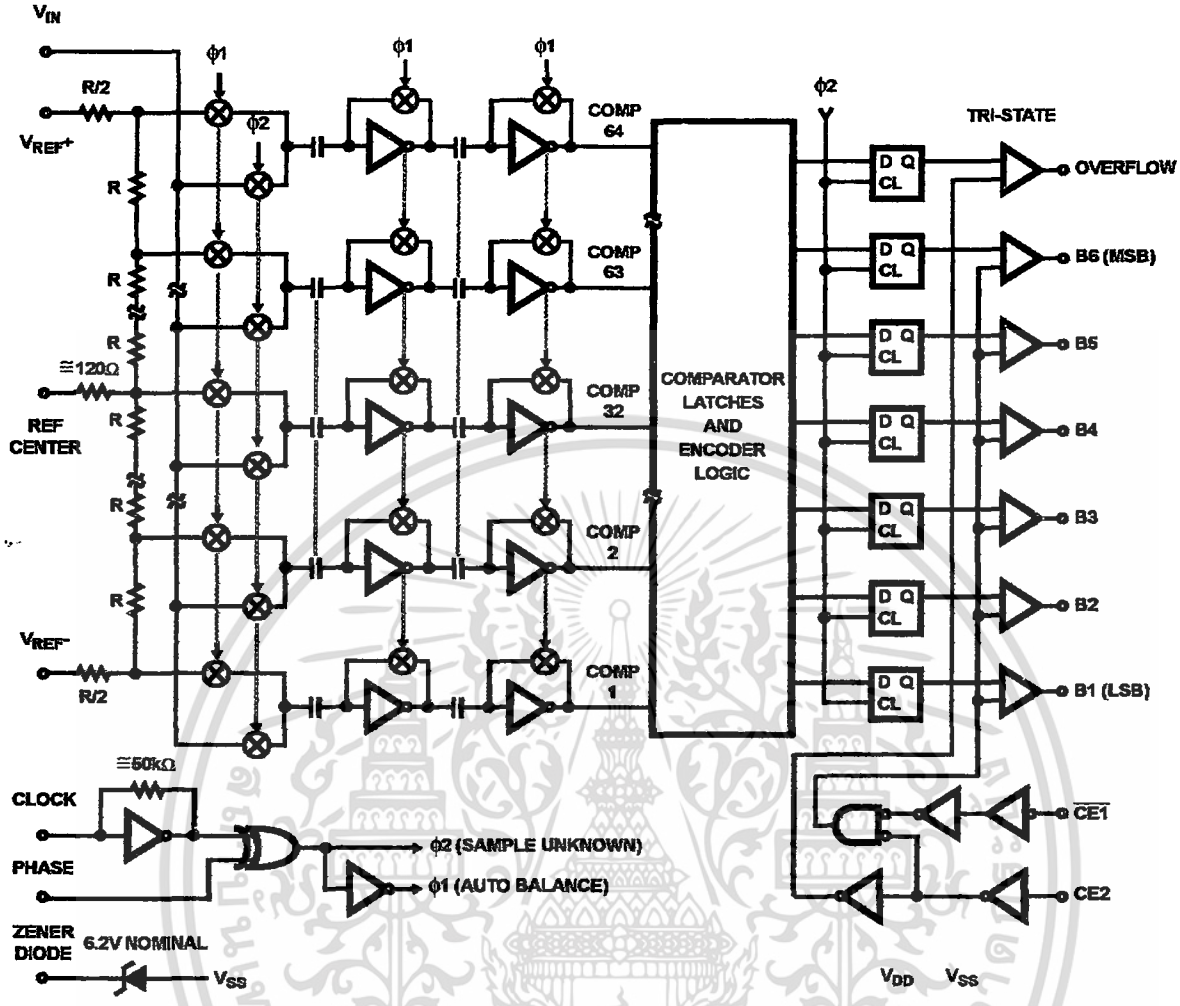
CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Users should follow proper I.C. Handling Procedures.

File Number **3102**

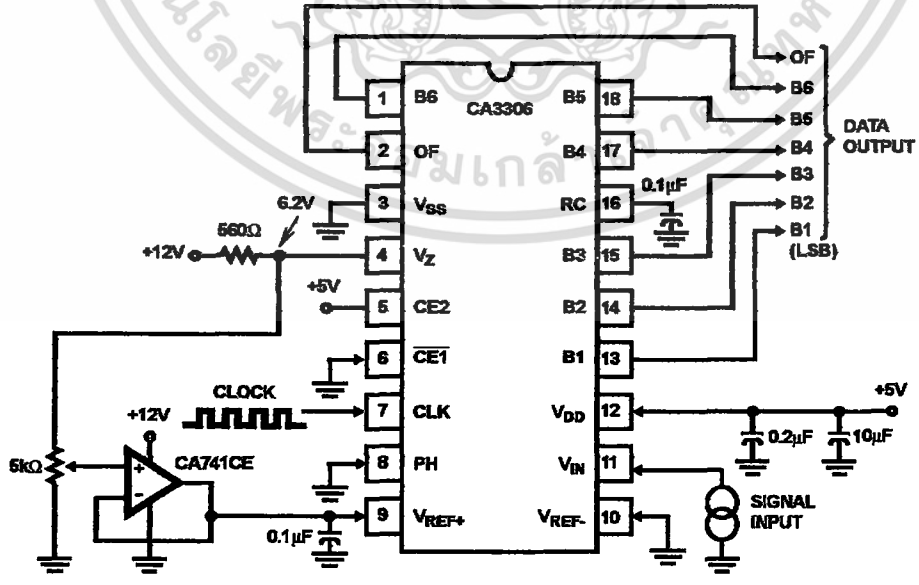
Copyright © Harris Corporation 1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Functional Block Diagram



Typical Application Circuit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

DC Supply Voltage Range, V_{DD}
- Voltage Referenced to V_{SS} Terminal . . . . . -0.5V to +8.5V

Input Voltage Range
- All Inputs Except Zener . . . . . -0.5V to V_{DD} + 0.5V

DC Input Current
- CLK, PH, $\overline{CE1}$, CE2, V_{IN} . . . . . ±20mA

Storage Temperature Range . . . . . -65°C to +150°C

Lead Temperature (Soldering 10s) . . . . . +300°C

Thermal Information

Thermal Resistance	θ_{JA}	θ_{JC}
Ceramic DIP Package	70°C/W	12°C/W
Plastic DIP	95°C/W	-
Plastic SOIC	95°C/W	-
Ceramic LCC	65°C/W	12°C/W

Maximum Power Dissipation
- E, M, or D Package 315mW

Operating Temperature Range (T_A)
- Ceramic Package (D Suffix) . . . . . -55°C to +125°C
- Plastic Package (E or M Suffix) . . . . . -40°C to +85°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

Operating Conditions

Supply Voltage Range . . . . . 3V to 6V

Max Junction Temperature
- Ceramic Package . . . . . +175°C
- Plastic Package . . . . . +150°C

Electrical Specifications

T_A = +25°C, V_{DD} = 5V, V_{REF}+ = 4.8V, V_{SS} = V_{REF}- = GND, Clock = 15MHz Square Wave for CA3306 or CA3306A, 10MHz for CA3306C

PARAMETERS		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
SYSTEM PERFORMANCE						
Resolution			6	-	-	Bits
Integral Linearity Error, INL	CA3306, CA3306C		-	±0.25	±0.5	LSB
	CA3306A		-	±0.2	±0.25	LSB
Differential Linearity Error, DNL	CA3306, CA3306C		-	±0.25	±0.5	LSB
	CA3306A		-	±0.2	±0.25	LSB
Offset Error (Unadjusted)	CA3306, CA3306C	(Note 1)	-	±0.5	±1	LSB
	CA3306A		-	±0.25	±0.5	LSB
Gain Error (Unadjusted)	CA3306, CA3306C	(Note 2)	-	±0.5	±1	LSB
	CA3306A		-	±0.25	±0.5	LSB
Gain Temperature Coefficient			-	+0.1	-	mV/°C
Offset Temperature Coefficient			-	-0.1	-	mV/°C
DYNAMIC CHARACTERISTICS (Input Signal Level 0.5dB Below Full Scale)						
Maximum Conversion Speed	CA3306C		10	13	-	MSPS
	CA3306, CA3306A		15	20	-	MSPS
Maximum Conversion Speed	CA3306C	(Note 4) $\phi1, \phi2 \geq$ Minimum	12	-	-	MSPS
	CA3306, CA3306A		18	-	-	MSPS
Allowable Input Bandwidth		(Note 4)	DC	-	$f_{CLOCK/2}$	MHz
-3dB Input Bandwidth			-	30	-	MHz
Signal to Noise Ratio (SNR) $= \frac{\text{RMS Signal}}{\text{RMS Noise}}$		F_S = 15MHz, f_{IN} = 100kHz	-	34.6	-	dB
		F_S = 15MHz, f_{IN} = 5MHz	-	33.4	-	dB
Signal to Noise Ratio (SINAD) $= \frac{\text{RMS Signal}}{\text{RMS Noise+Distortion}}$		F_S = 15MHz, f_{IN} = 100kHz	-	34.2	-	dB
		F_S = 15MHz, f_{IN} = 5MHz	-	29.0	-	dB
Total Harmonic Distortion, THD		F_S = 15MHz, f_{IN} = 100kHz	-	-46.0	-	dBc
		F_S = 15MHz, f_{IN} = 5MHz	-	-30.0	-	dBc
Effective Number of Bits (ENOB)		F_S = 15MHz, f_{IN} = 100kHz	-	5.5	-	Bits
		F_S = 15MHz, f_{IN} = 5MHz	-	4.5	-	Bits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Specifications T_A = +25°C, V_{DD} = 5V, V_{REF}+ = 4.8V, V_{SS} = V_{REF}- = GND, Clock = 15MHz Square Wave for CA3306 or CA3306A, 10MHz for CA3306C **(Continued)**

PARAMETERS		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
ANALOG INPUTS						
Positive Full Scale Input Range		(Notes 3, 4)	1	4, 8	V_{DD} + 0.5	V
Negative Full Scale Input Range		(Notes 3, 4)	-0.5	0	V_{DD} - 1	V
Input Capacitance			-	15	-	pF
Input Current		V_{IN} = 4.92V, V_{DD} = 5V	-	-	±500	µA
INTERNAL VOLTAGE REFERENCE						
Zener Voltage		I_Z = 10mA	5.4	6.2	7.4	V
Zener Dynamic Impedance		I_Z = 10mA, 20mA	-	12	25	Ω
Zener Temperature Coefficient			-	-0.5	-	mV/°C
REFERENCE INPUTS						
Resistor Ladder Impedance			650	1100	1550	Ω
DIGITAL INPUTS						
Maximum V_{IN}, Logic 0		All Digital Inputs (Note 4)	-	-	0.3 x V_{DD}	V
Maximum V_{IN}, Logic 1		All Digital Inputs (Note 4)	0.7 x V_{DD}	-	-	V
Digital Input Current		Except CLK, V_{IN} = 0V, 5V	-	±1	±5	µA
Digital Input Current		CLK Only	-	±100	±200	µA
DIGITAL OUTPUTS						
Digital Output Tri-State Leakage		V_{OUT} = 0V, 5V	-	±1	±5	µA
Digital Output Source Current		V_{OUT} = 4.6V	-1.6	-	-	mA
Digital Output Sink Current		V_{OUT} = 0.4V	3.2	-	-	mA
TIMING CHARACTERISTICS						
Auto Balance Time (ϕ1)	CA3306C		50	-	∞	ns
	CA3306, CA3306A		33	-	∞	
Sample Time (ϕ2)	CA3306C	(Note 4)	33	-	5000	ns
	CA3306, CA3306A		22	-	5000	ns
Aperture Delay			-	8	-	ns
Aperture Jitter			-	100	-	ps_{P-P}
Output Data Valid Delay (T_D)	CA3306C		-	35	50	ns
	CA3306, CA3306A		-	30	40	ns
Output Data Hold Time (T_H)		(Note 4)	15	25	-	ns
Output Enable Time, (T_{EN})			-	20	-	ns
Output Disable Time (T_{DIS})			-	15	-	ns
POWER SUPPLY CHARACTERISTICS						
I_{DD} Current, Refer to Figure 4	CA3306C	Continuous Conversion (Note 4)	-	11	20	mA
	CA3306, CA3306A		-	14	25	mA
I_{DD} Current		Continuous ϕ1	-	7.5	15	mA

NOTES:

1. OFFSET ERROR is the difference between the input voltage that causes the 00 to 01 output code transition and (V_{REF}+ - V_{REF}-)/128.
2. GAIN ERROR is the difference the input voltage that causes the $3F_{16}$ to overflow output code transition and (V_{REF}+ - V_{REF}-) x 127/128.
3. The total input voltage range, set by V_{REF}+ and V_{REF}-, may be in the range of 1 to (V_{DD} + 1) V.
4. Parameter not tested, but guaranteed by design or characterization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Timing Waveforms

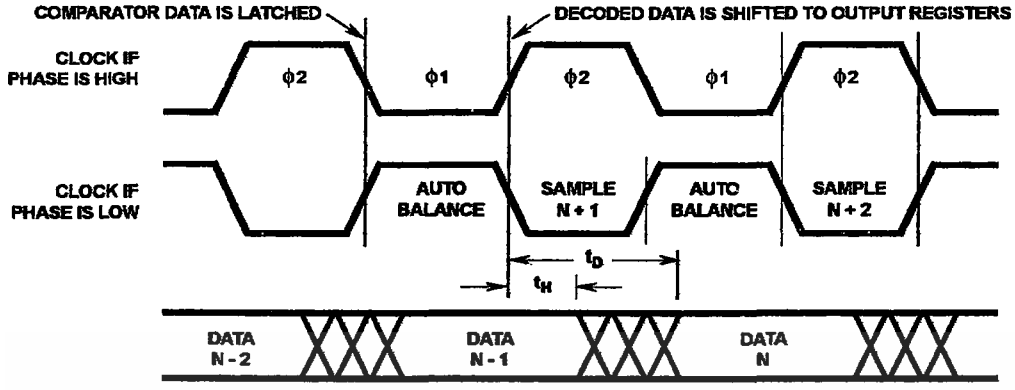


FIGURE 1. INPUT-TO-OUTPUT

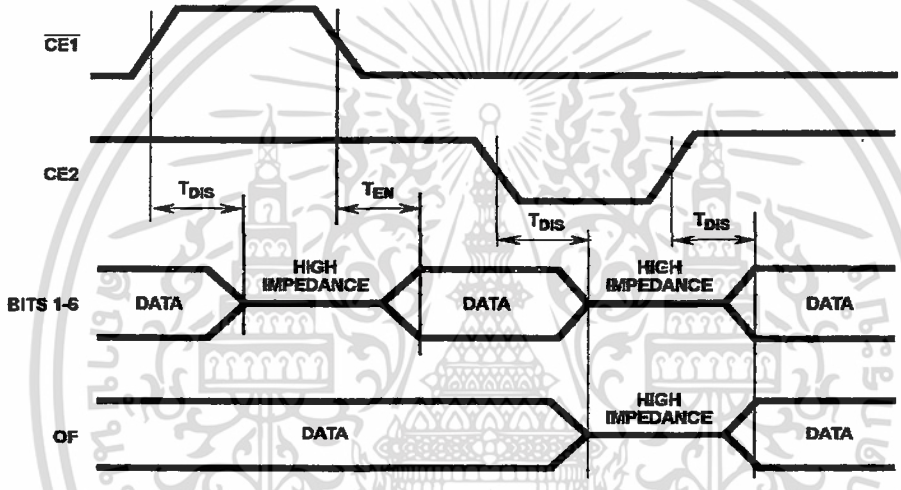


FIGURE 2. OUTPUT ENABLE

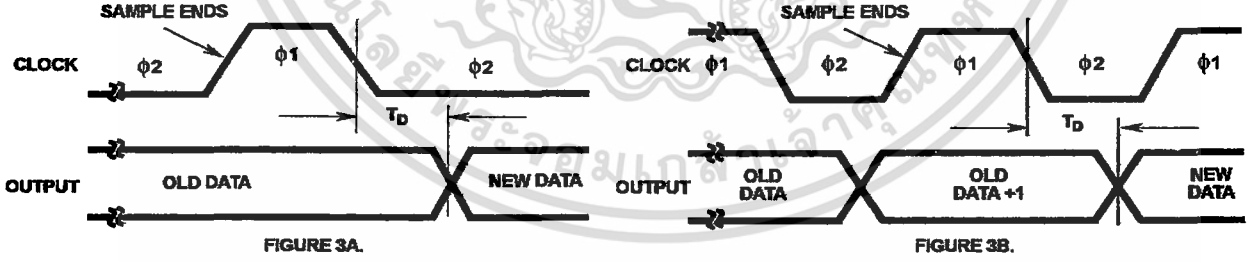


FIGURE 3A.

FIGURE 3B.

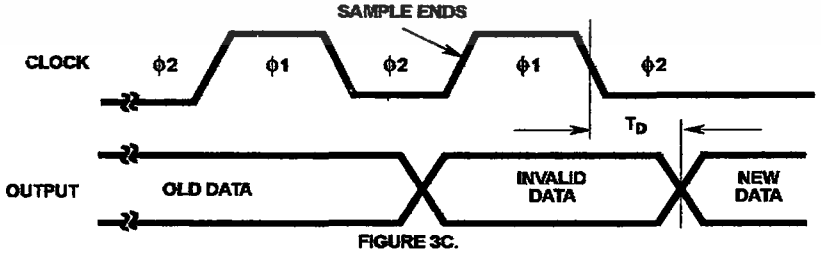


FIGURE 3C.

FIGURE 3. PULSE MODE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves

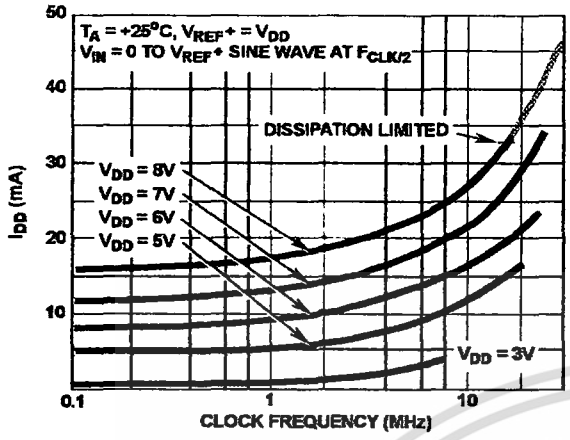


FIGURE 4. TYPICAL I_{DD} AS A FUNCTION OF V_{DD}

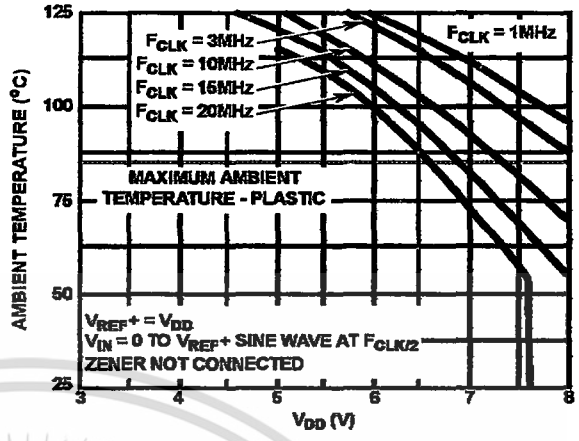


FIGURE 5. TYPICAL MAXIMUM AMBIENT TEMPERATURE AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE

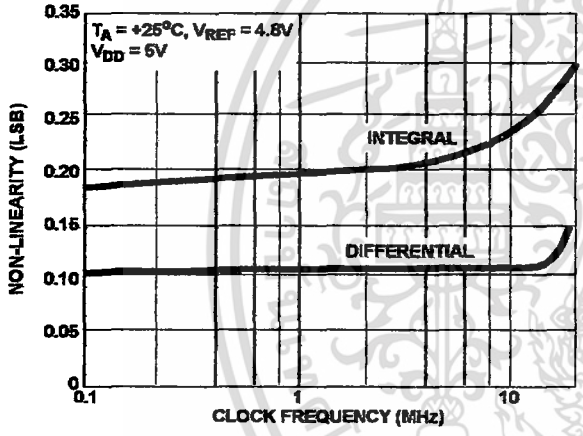


FIGURE 6. TYPICAL NON-LINEARITY AS A FUNCTION OF CLOCK SPEED

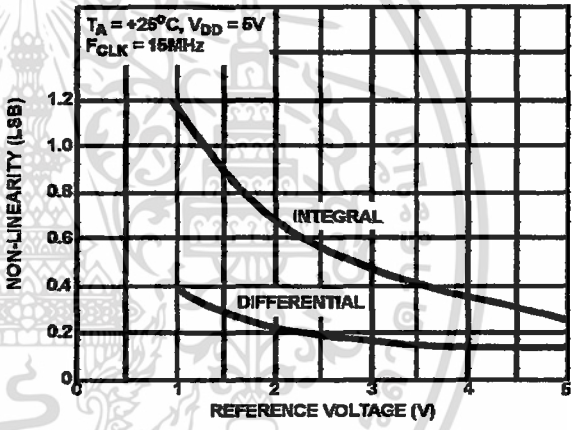


FIGURE 7. TYPICAL NON-LINEARITY AS A FUNCTION OF REFERENCE VOLTAGE

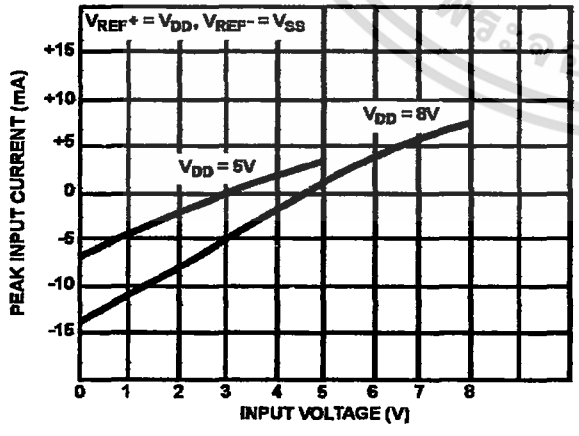


FIGURE 8. TYPICAL PEAK INPUT CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT VOLTAGE

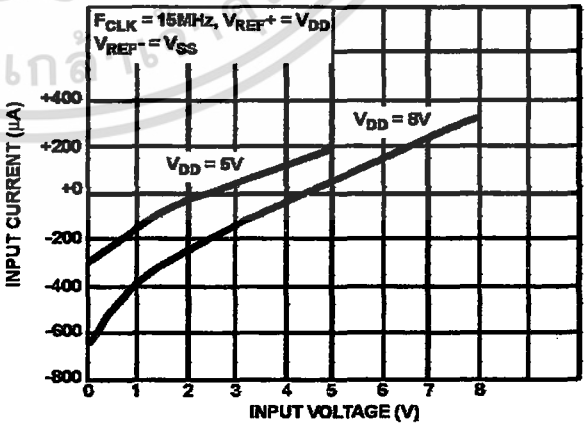


FIGURE 9. TYPICAL AVERAGE INPUT CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT VOLTAGE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves (Continued)

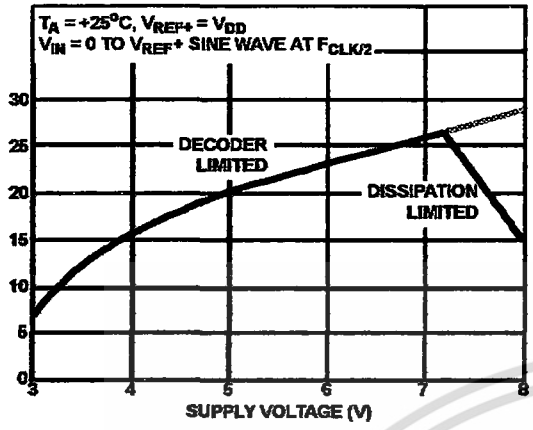


FIGURE 10. TYPICAL MAXIMUM CLOCK FREQUENCY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE

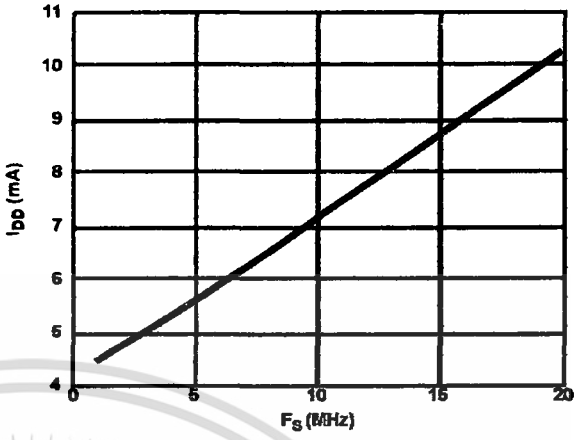


FIGURE 11. DEVICE CURRENT vs SAMPLE FREQUENCY

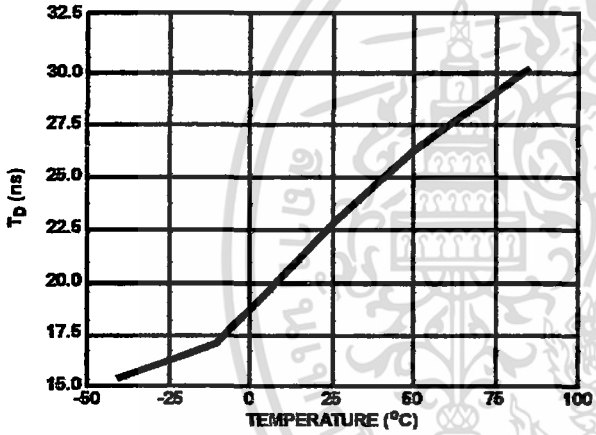


FIGURE 12. DATA DELAY vs TEMPERATURE

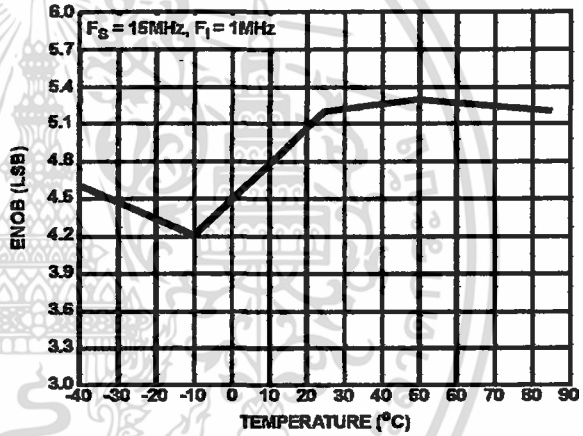


FIGURE 13. ENOB vs TEMPERATURE

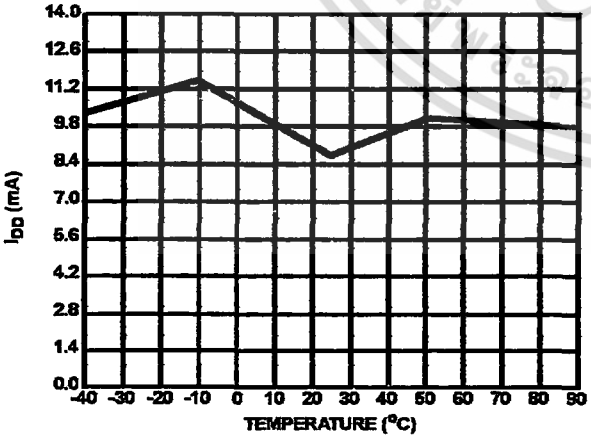


FIGURE 14. I_{DD} vs TEMPERATURE

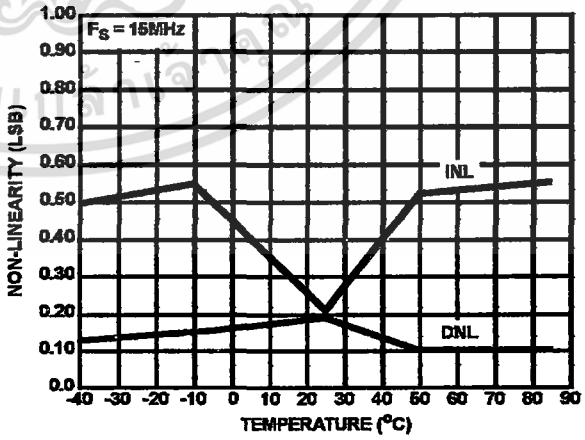


FIGURE 15. NON-LINEARITY vs TEMPERATURE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Curves (Continued)

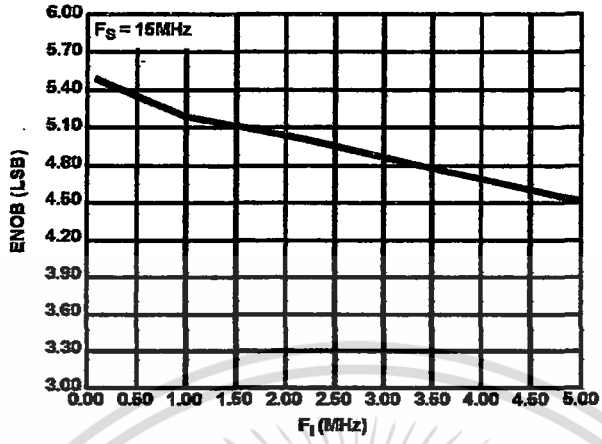


FIGURE 18. ENOB vs INPUT FREQUENCY

Pin Descriptions

PIN NUMBER			
DIP	SOIC	NAME	DESCRIPTION
1	1	B6	Bit 6, Output (MSB).
2	2	OF	Overflow, Output.
3	3, 4	V_{SS}	Digital Ground.
4	5	VZ	Zener Reference Output.
5	6	CE2	Tri-State Output Enable Input, Active Low. See Table 1.
6	7	$\overline{CE1}$	Tri-State Output Enable Input, Active High. See Table 1.
7	8	CLK	Clock Input.
8	9	Phase	Sample clock phase control input. When PHASE is low, "Sample Unknown" occurs when the clock is low and "Auto Balance" occurs when the clock is high (see text).
9	10	$V_{REF}+$	Reference Voltage Positive Input.
10	11	$V_{REF}-$	Reference Voltage Negative Input.
11	12	V_{IN}	Analog Signal Input.
12	13, 14	V_{DD}	Power Supply, +5V.
13	15	B1	Bit 1, Output (LSB).
14	16	B2	Bit 2, Output.
15	17	B3	Bit 3, Output.
16	18	REF(CTR)	Reference Ladder Midpoint.
17	19	B4	Bit 4, Output.
18	20	B5	Bit 5, Output.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1. CHIP ENABLE TRUTH TABLE

$\overline{CE1}$	CE2	B1 - B6	OF
0	1	Valid	Valid
1	1	Tri-State	Valid
X	0	Tri-State	Tri-State

X = Don't care

TABLE 2. OUTPUT CODE TABLE

CODE DESCRIPTION	(NOTE 1) INPUT VOLTAGE				BINARY OUTPUT CODE (LSB)							DECIMAL COUNT
	V_{REF} 6.40 (V)	V_{REF} 5.12 (V)	V_{REF} 4.80 (V)	V_{REF} 3.20 (V)	OF	B6	B5	B4	B3	B2	B1	
Zero	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
1 LSB	0.10	0.08	0.075	0.05	0	0	0	0	0	0	1	1
2 LSB	0.20	0.16	0.15	0.10	0	0	0	0	0	1	0	2
•		•						•				•
•		•						•				•
•		•						•				•
•		•						•				•
$^1/_2$ Full Scale - 1 LSB	3.10	2.48	2.325	1.55	0	0	1	1	1	1	1	31
$^1/_2$ Full Scale	3.20	2.56	2.40	1.60	0	1	0	0	0	0	0	32
$^1/_2$ Full Scale + 1 LSB	3.30	2.64	2.475	1.65	0	1	0	0	0	0	1	33
•		•						•				•
•		•						•				•
•		•						•				•
•		•						•				•
Full Scale - 1 LSB	6.20	4.96	4.65	3.10	0	1	1	1	1	1	0	62
Full Scale	6.30	5.04	4.725	3.15	0	1	1	1	1	1	1	63
Overflow	6.40	5.12	4.80	3.20	1	1	1	1	1	1	1	127

NOTE:

1. The voltages listed above are the ideal centers of each output code shown as a function of its associated reference voltage.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Device Operation

A sequential parallel technique is used by the CA3306 converter to obtain its high speed operation. The sequence consists of the "Auto Balance" phase $\phi 1$ and the "Sample Unknown" phase $\phi 2$. (Refer to the circuit diagram.) Each conversion takes one clock cycle.* With the phase control low, the "Auto Balance" ($\phi 1$) occurs during the High period of the clock cycle, and the "Sample Unknown" ($\phi 2$) occurs during the low period of the clock cycle.

During the "Auto Balance" phase, a transmission-gate switch is used to connect each of 64 commutating capacitors to their associated ladder reference tap. Those tap voltages will be as follows:

$$V_{TAP}(N) = [(V_{REF}/64) \times N] - [V_{REF}/(2 \times 64)]$$
$$= V_{REF}[(2N - 1)/126]$$

Where: $V_{TAP}(N)$ = reference ladder tap voltage at point N
V_{REF} = voltage across V_{REF}- to V_{REF}+
N = tap number (1 through 64)

* This device requires only a single-phase clock The terminology of $\phi 1$ and $\phi 2$ refers to the High and Low periods of the same clock.

The other side of the capacitor is connected to a single-stage inverting amplifier whose output is shorted to its input by a switch. This biases the amplifier at its intrinsic trip point, which is approximately, $(V_{DD} - V_{SS})/2$. The capacitors now charge to their associated tap voltages, priming the circuit for the next phase.

In the "Sample Unknown" phase, all ladder tap switches are opened, the comparator amplifiers are no longer shorted, and V_{IN} is switched to all 64 capacitors. Since the other end of the capacitor is now looking into an effectively open circuit, any voltage that differs from the previous tap voltage will appear as a voltage shift at the comparator amplifiers. All comparators whose tap voltages were lower than V_{IN} will drive the comparator outputs to a "low" state. All comparators whose tap voltages were higher than V_{IN} will drive the comparator outputs to a "high" state. A second, capacitor-coupled, auto-zeroed amplifier further amplifies the outputs.

The status of all these comparator amplifiers are stored at the end of this phase ($\phi 2$), by a secondary latching amplifier stage. Once latched, the status of the 64 comparators is decoded by a 64-bit 7-bit decode array and the results are clocked into a storage register at the rising edge of the next $\phi 2$.

A tri-state buffer is used at the output of the 7 storage registers which are controlled by two chip-enable signals. $\overline{CE1}$ will independently disable B1 through B6 when it is in a high state. CE2 will independently disable B1 through B6 and the OF buffers when it is in the low state (Table 1).

To facilitate usage of this device a phase-control input is provided which can effectively complement the clock as it enters the chip. Also, an on-board zener is provided for use as a reference voltage.

Continuous Clock Operation

One complete conversion cycle can be traced through the CA3306 via the following steps. (Refer to timing diagram, Figure 1.) With the phase control in a "High" state, the rising edge of the clock input will start a "sample" phase. During this entire "High" state of the clock, the 64 comparators will track the input voltage and the 64 latches will track the comparator outputs. At the falling edge of the clock, after the specified aperture delay, all 64 comparator outputs are captured by the 64 latches. This ends the "sample" phase and starts the "auto balance" phase for the comparators. During this "Low" state of the clock the output of the latches propagates through the decode array and a 7-bit code appears at the D inputs of the output registers. On the next rising edge of the clock, this 7-bit code is shifted into the output registers and appears with time delay to as valid data at the output of the tri-state drivers. This also marks the start of a new "sample" phase, thereby repeating the conversion process for this next cycle.

Pulse Mode Operation

For sampling high speed nonrecurrent or transient data, the converter may be operated in a pulse mode in one of three ways. The fastest method is to keep the converter in the Sample Unknown phase, $\phi 2$, during the standby state. The device can now be pulsed through the Auto Balance phase with a single pulse. The analog value is captured on the leading edge of $\phi 1$ and is transferred into the output registers on the trailing edge of $\phi 1$. We are now back in the standby state, $\phi 2$, and another conversion can be started, but not later than 5µs due to the eventual droop of the commutating capacitors. Another advantage of this method is that it has the potential of having the lowest power drain. The larger the time ratio between $\phi 2$ and $\phi 1$, the lower the power consumption. (See Timing Waveform, Figure 3.)

The second method uses the Auto Balance phase, $\phi 1$, as the standby state. In this state the converter can stay indefinitely waiting to start a conversion. A conversion is performed by strobing the clock input with two $\phi 2$ pulses. The first pulse starts a Sample Unknown phase and captures the analog value in the comparator latches on the trailing edge. A second $\phi 2$ pulse is needed to transfer the data into the output registers. This occurs on the leading edge of the second pulse. The conversion now takes slightly longer, but the repetition rate may be as slow as desired. The disadvantage to this method is the higher device dissipation due to the low ratio of $\phi 2$ to $\phi 1$. (See Timing Waveform, Figure 3B.)

For applications requiring both indefinite standby and lowest power, standby can be in the $\phi 2$ (Sample Unknown) state with two $\phi 1$ pulses to generate valid data (see Figure 3C). Valid data now appears two full clock cycles after starting the conversion process.

Analog Input Considerations

The CA3306 input terminal is characterized by a small capacitance (see Specifications) and a small voltage-dependent current (See Typical Performance Curves). The signal-source impedance should be kept low, however, when operating the CA3306 at high clock rates.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The CA3306 outputs a short (less than 10ns) current spike of up to several mA amplitude (See Typical Performance Curves) at the beginning of the sample phase. (To a lesser extent, a spike also appears at the beginning of auto balance.) The driving source must recover from the spike by the end of the same phase, or a loss of accuracy will result.

A locally terminated 50Ω or 75Ω source is generally sufficient to drive the CA3306. If gain is required, a high speed, fast settling operational amplifier, such as the HA-5033, HA-2542, or HA5020 is recommended.

Digital Input And Output Interfacing

The two chip-enable and the phase-control inputs are standard CMOS units. They should be driven from less than 0.3 x V_{DD} to at least 0.7 x V_{DD}. This can be done from 74HC series CMOS (QMOS), TTL with pull-up resistors, or, if V_{DD} is greater than the logic supply, open collector or open drain drivers plus pull-ups. (See Figure 20.)

The clock input is more critical to timing variations, such as $\phi 1$ becoming too short, for instance. Pull-up resistors should generally be avoided in favor of active drivers. The clock input may be capacitively coupled, as it has an internal 50kΩ feedback resistor on the first buffer stage, and will seek its own trip point. A clock source of at least $1V_{P-P}$ is adequate, but extremely non-symmetrical waveforms should be avoided.

The output drivers have full rail-to-rail capability. If driving CMOS systems with V_{DD} below the V_{DD} of the CA3306, a CD74HC4050 or CD74HC4049 should be used to step down the voltage. If driving LSTTL systems, no step-down should be necessary, as most LSTTLs will take input swings up to 10V to 15V.

Although the output drivers are capable of handling typical data bus loading, the capacitor charging currents will produce local ground disturbances. For this reason, an external bus driver is recommended.

Increased Accuracy

In most cases the accuracy of the CA3306 should be sufficient without any adjustments. In applications where accuracy is of utmost importance, three adjustments can be made to obtain better accuracy; i.e., offset trim, gain trim, and midpoint trim.

Offset Trim

In general offset correction can be done in the preamp circuitry by introducing a DC shift to V_{IN} or by the offset trim of the operational amplifier. When this is not possible the V_{REF}^- input can be adjusted to produce an offset trim. The theoretical input voltage to produce the first transition is 1/2 LSB. The equation is as follows:

$$V_{IN}\ (0 \text{ to } 1 \text{ transition}) = {}^1/_2 \text{ LSB} = {}^1/_2(V_{REF}/64)$$
$$= V_{REF}/128$$

If V_{IN} for the first transition is less than the theoretical, then a single-turn 50Ω pot connected between V_{REF}^- and ground will accomplish the adjustment. Set V_{IN} to $^1/_2$ LSB and trim the pot until the 0 to 1 transition occurs.

If V_{IN} for the first transition is greater than the theoretical, then the 50Ω pot should be connected between V_{REF} and a negative voltage of about 2 LSBs. The trim procedure is as stated previously.

Gain Trim

In general the gain trim can also be done in the preamp circuitry by introducing a gain adjustment for the operational amplifier. When this is not possible, then a gain adjustment circuit should be made to adjust the reference voltage. To perform this trim, V_{IN} should be set to the 63 to overflow transition. That voltage is $^1/_2$ LSB less than V_{REF}^+ and is calculated as follows:

$$V_{IN}\ (63 \text{ to } 64 \text{ transition}) = V_{REF} - V_{REF}/128$$
$$= V_{REF}(127/128)$$

To perform the gain trim, first do the offset trim and then apply the required V_{IN} for the 63 to overflow transition. Now adjust V_{REF}^+ until that transition occurs on the outputs.

Midpoint Trim

The reference center (RC) is available to the user as the midpoint of the resistor ladder. To trim the midpoint, the offset and gain trims should be done first. The theoretical transition from count 31 to 32 occurs at 31 $^1/_2$ LSBs. That voltage is as follows:

$$V_{IN}\ (31 \text{ to } 32 \text{ transition}) = 31.5\ (V_{REF}/64)$$
$$= V_{REF}(63/128)$$

An adjustable voltage follower can be connected to the RC pin or a 2k pot can be connected between V_{REF}^+ and V_{REF}^- with the wiper connected to RC. Set V_{IN} to the 31 to 32 transition voltage, then adjust the voltage follower or the pot until the transition occurs on the output bits.

The Reference Center point can also be used to create unique transfer functions. The user must remember, however, that there is approximately 120Ω in series with the RC pin.

Applications

7-Bit Resolution

To obtain 7-bit resolution, two CA3306s can be wired together. Necessary ingredients include an open-ended ladder network, an overflow indicator, tri-state outputs, and chip-enabler controls - all of which are available on the CA3306.

The first step for connecting a 7-bit circuit is to totem-pole the ladder networks, as illustrated in Figure 17. Since the absolute resistance value of each ladder may vary, external trim of the mid-reference voltage may be required.

The overflow output of the lower device now becomes the seventh bit. When it goes high, all counts must come from the upper device. When it goes low, all counts must come from the lower device. This is done simply by connecting the lower overflow signal to the $\overline{CE1}$ control of the lower A/D converter and the CE2 control of the upper A/D converter. The tri-state outputs of the two devices (bits 1 through 6) are now connected in parallel to complete the circuitry.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Doubled Sampling Speed

The phase control and both positive and negative true chip enables allow the parallel connection of two CA3306s to double the sampling speed. Figure 18 shows this configuration. One converter samples on the positive phase of the clock, and the second on the negative. The outputs are also alternately enabled. Care should be taken to provide a near square-wave clock it operating at close to the maximum clock speed for the devices.

8-Bit to 12-Bit Conversion Techniques

To obtain 8-bit to 12-bit resolution and accuracy, use a feed-forward conversion technique. Two A/D converters will be needed to convert up to 11 bits; three A/D converters to convert 12 bits. The high speed of the CA3306 allows 12-bit conversions in the 500ns to 900ns range.

The circuit diagram of a high-speed 12-bit A/D converter is shown in Figure 19. In the feed-forward conversion method two sequential conversions are made. Converter A first does a coarse conversion to 6 bits. The output is applied to a 6-bit D/A converter whose accuracy level is good to 12 bits. The D/A converter output is then subtracted from the input voltage, multiplied by 32, and then converted by a second flash A/D converter, which is connected in a 7-bit configuration. The answers from the first and second conversions are added together with bit 1 of the first conversion overlapping bit 7 of the second conversion.

When using this method, take care that:

- The linearity of the first converter is better than $^1/_2$ LSB.
- An offset bias of 1 LSB (1/64) is subtracted from the first conversion since the second converter is unipolar.
- The D/A converter and its reference are accurate to the total number of bits desired for the final conversion (the A/D converter need only be accurate to 6 bits).

The first converter can be offset-biased by adding a 20Ω resistor at the bottom of the ladder and increasing the reference voltage by 1 LSB. If a 6.4V reference is used in the system, for example, then the first CA3306 will require a 6.5V reference.

Definitions

Dynamic Performance Definitions

Fast Fourier Transform (FFT) techniques are used to evaluate the dynamic performance of the converter. A low distortion sine wave is applied to the input, it is sampled, and the output is stored in RAM. The data is then transformed into the frequency domain with a 4096 point FFT and analyzed to evaluate the dynamic performance of the A/D. The sine wave input to the part is -0.5dB down from fullscale for all these tests.

Signal-to-Noise (SNR)

SNR is the measured RMS signal to RMS noise at a specified input and sampling frequency. The noise is the RMS sum of all of the spectral components except the fundamental and the first five harmonics.

Signal-to-Noise + Distortion Ratio (SINAD)

SINAD is the measured RMS signal to RMS sum of all other spectral components below the Nyquist frequency excluding DC.

Effective Number of Bits (ENOB)

The effective number of bits (ENOB) is derived from the SINAD data. ENOB is calculated from:

$$ENOB = (SINAD - 1.76 + V_{CORR})/6.02$$

where: $V_{CORR} = 0.5dB$

Total Harmonic Distortion (THD)

THD is the ratio of the RMS sum of the first 5 harmonic components to the RMS value of the measured input signal.

Operating and Handling Considerations

1. Handling

All inputs and outputs of Harris CMOS devices have a network for electrostatic protection during handling. Recommended handling practices for CMOS devices are described in AN6525. "Guide to Better Handling and Operation of CMOS Integrated Circuits."

2. Operating

Operating Voltage

During operation near the maximum supply voltage limit, care should be taken to avoid or suppress power supply turn-on and turn-off transients, power supply ripple, or ground noise; any of these conditions must not cause $V_{DD} - V_{SS}$ to exceed the absolute maximum rating.

Input Signals

To prevent damage to the input protection circuit, input signals should never be greater than V_{DD} nor less than V_{SS}. Input currents must not exceed 20mA even when the power supply is off. The zener (pin 4) is the only terminal allowed to exceed V_{DD}.

Unused Inputs

A connection must be provided at every input terminal. All unused input terminals must be connected to either V_{DD} or V_{SS}, whichever is appropriate.

Output Short Circuits

Shorting of outputs to V_{DD} or V_{SS} may damage CMOS devices by exceeding the maximum device dissipation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Circuits

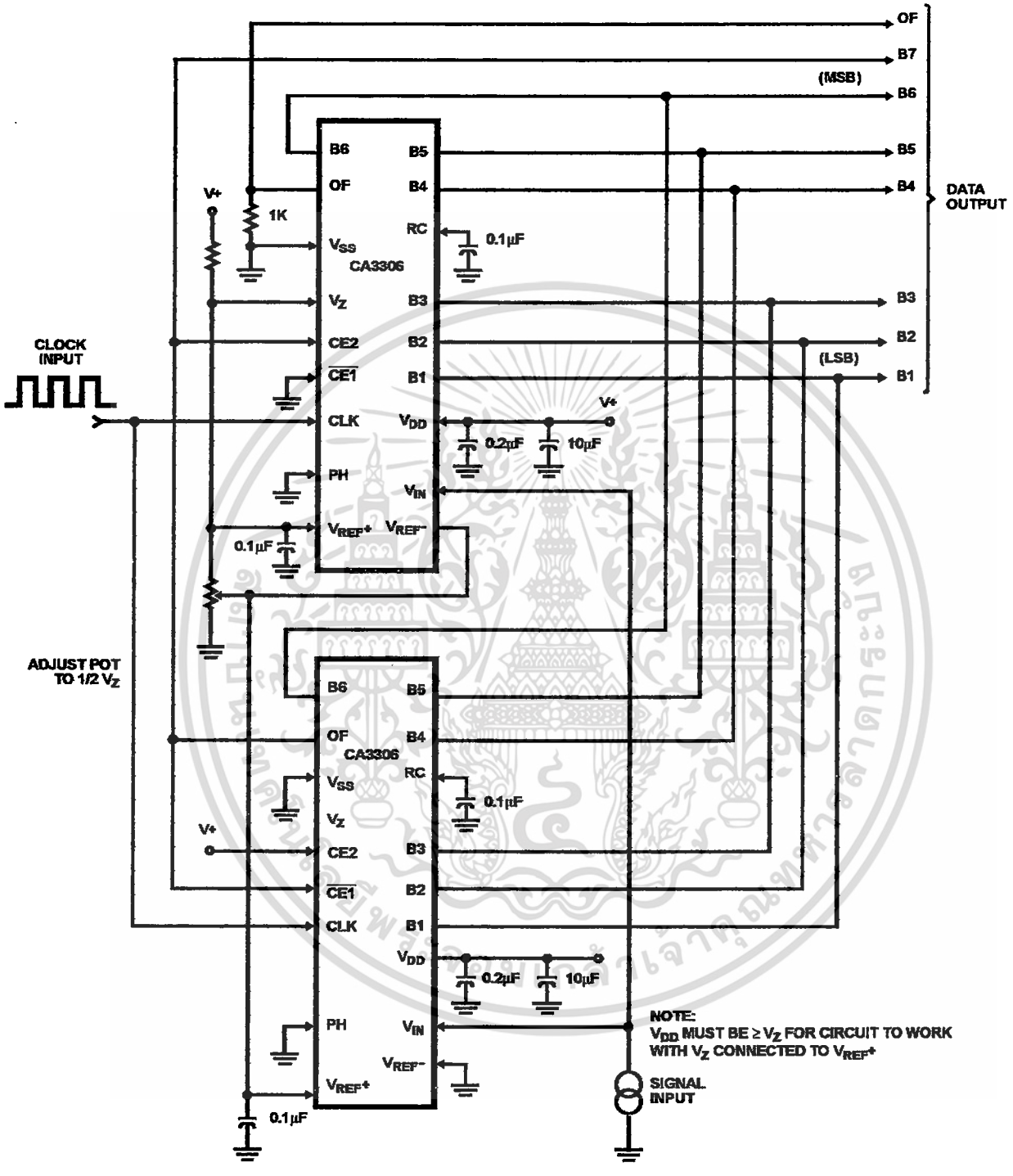


FIGURE 17. TYPICAL CA3306 7-BIT RESOLUTION CONFIGURATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Circuits (Continued)

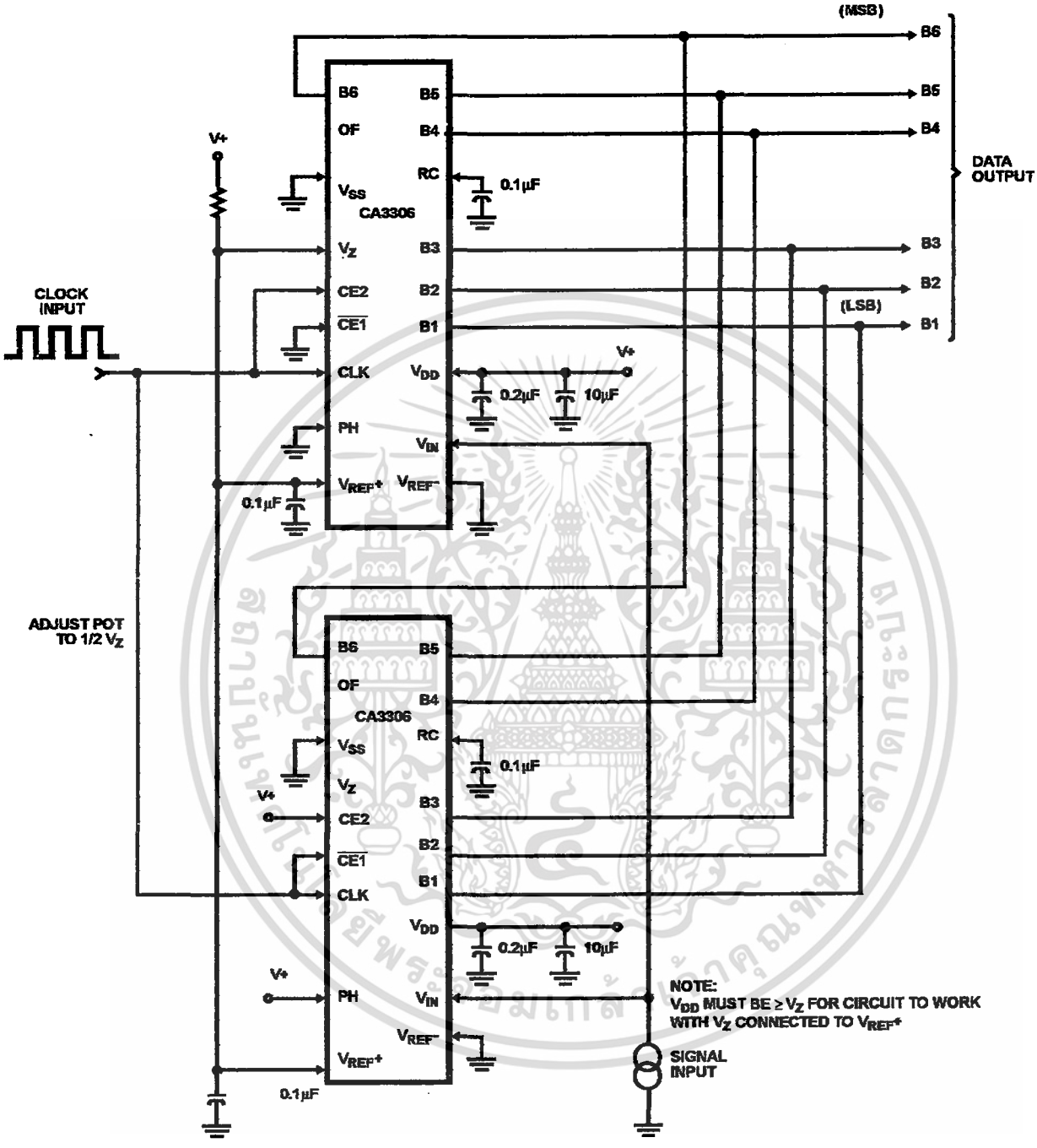


FIGURE 18. TYPICAL CA3306 6-BIT RESOLUTION CONFIGURATION WITH DOUBLE SAMPLING RATE CAPABILITY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Circuits (Continued)

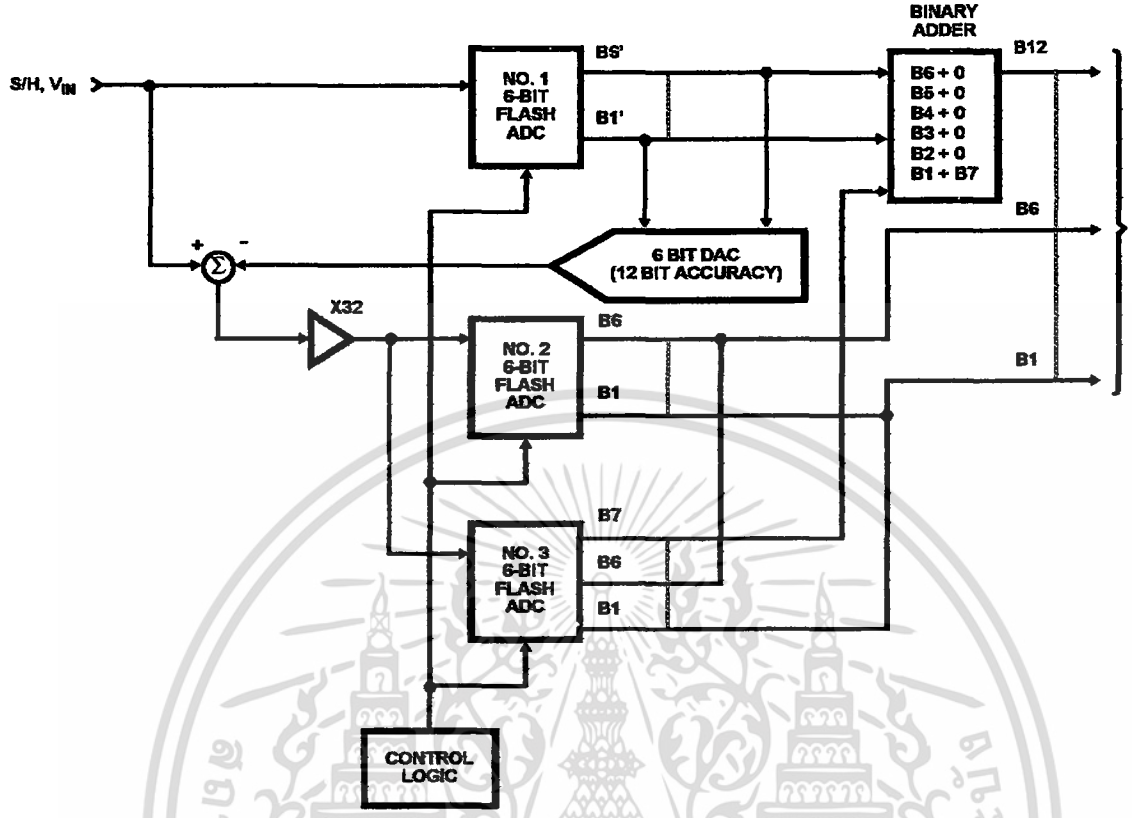
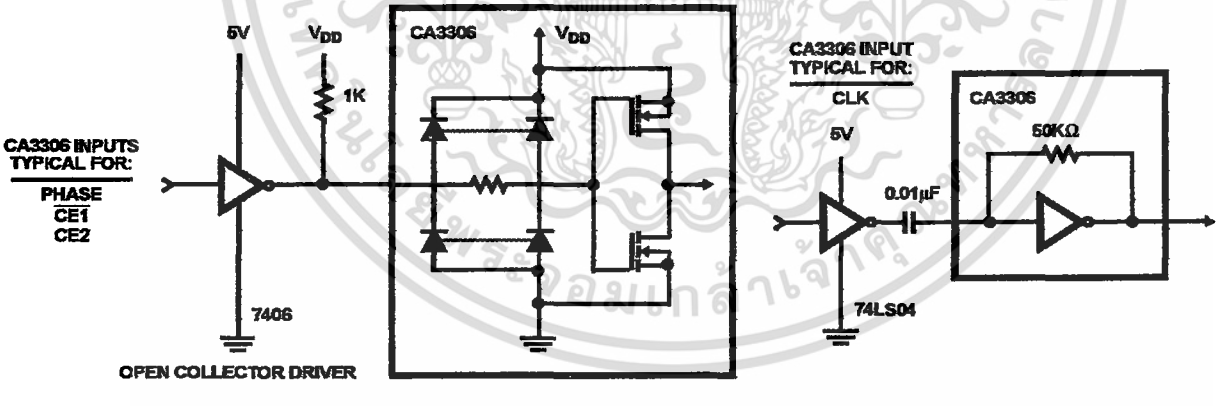


FIGURE 19. TYPICAL CA3306, 800ns, 12-BIT ADC SYSTEM



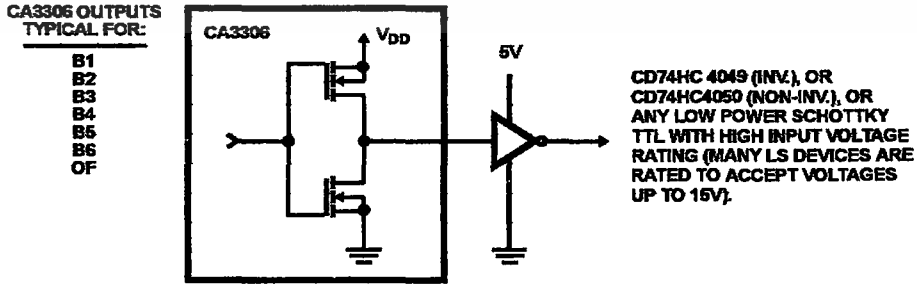


FIGURE 20. 5V LOGIC INTERFACE CIRCUIT FOR V_{DD} > 5.5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำโครงงานพิเศษ

นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ เกิดวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ.2518 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนศึกษานารีวิทยา จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปี 2539

นางสาวสรัญญา ญาติเสมอ เกิดวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ.2518 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชลราษฎรอำรุง จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาในปี 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้