



เครื่องวัดระยะและจุดเสี้ยวของสายเคเบิลแบบพกพาโดยใช้ FPGA
PORTABLE TIME DOMAIN REFLECTROMETER USING FPGA



โดย
นายสุธี อนันท์ธนาศาล
นายสุภาพ เขียวระยงค์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62102**
วัน,เดือน,ปี **31 ก.ค. 2549**

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

นางสาว หงษา เรือง
(Handwritten signature)

(Handwritten initials)

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดระยะและจุดเสี้ยวของสายเคเบิลแบบพกพาโดยใช้ FPGA
PORTABLE TIME DOMAIN REFLECTROMETER USING FPGA

โดย

นายสุธี อนันต์ชนกาล 45015080

นายสุภาพ เยียรระยงค์ 45015081

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ

อ. ศรวัฒน์ ชิวปรีชา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดระยะและจุดเสี้ยวของสายเคเบิลแบบพกพาโดยใช้ FPGA

PORTABLE TIME DOMAIN REFLECTROMETER USING FPGA

ผู้จัดทำ

1. นายสุธี อนันต์ชนศาล 45015080
2. นายสุภาพ เยียรระยงค์ 45015081

Lot

(รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ)

อ.ศรวัฒน์

(อ.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดระยะและจุดเสียของสายเคเบิลแบบพกพาโดยใช้ FPGA
Portable Time Domain Reflectrometer Using FPGA

โดย นายสุธี อนันท์ธนศาสตร์ 45015080
นายสุภาพ เขียวระยงศ์ 45015081

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ
อ. สรวัดน์ ชิวปรีชา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรออกแบบสร้าง เครื่องมือสำหรับวัดระยะและจุดเสียของสายเคเบิล โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับของคลื่น โดยการส่งพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล เมื่อพบปลายสายหรือจุดที่ชำรุด คลื่นจะสะท้อนกลับมา ช่วงเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับจะนำมาคำนวณเป็นระยะของจุดที่สายชำรุด ซึ่งลักษณะที่คลื่นสะท้อนกลับมา จะเป็นตัวบอกลักษณะการชำรุดของสาย ในส่วนจอแสดงผลใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมในการทำงานและในส่วนของวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบจุดเสียของสายใช้ภาษาVHDLในการออกแบบและสังเคราะห์เป็นวงจร รวมทั้งโปรแกรมลงอุปกรณ์ FPGA

ABSTRACT

This project presents the Time Domain Reflectrometer (TDR). It is equipment for measure distances and fault of transmission line. TDR utilizing the principle of wave reflection by transmitted pulse signal into transmission line when found end of line or fault point, pulse signal will reflect. Time propagating on a line indicated distances and type of reflect wave indicated type of damage. This project has utilized the digital technology in processing so it can make result exactly. We use micro-controller control LCD. We designed program for measure distances and fault point of transmission line by VHDL , followed by programming the data of design onto FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนในการทำโครงการ	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ชนิดของสายส่ง	3
2.1.1 สายคู่แบบบิด	3
2.1.2 สายโคแอกเชียล	3
2.1.3 สายคู่ขนาน	3
2.1.4 สายคู่ชิด	3
2.2 พารามิเตอร์กระจายของสายส่ง	5
2.3 อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายส่ง	12
2.4 ค่าคงตัวของการแพร่	14
2.5 ความยาวและความเร็วของคลื่นจรบนสายส่ง	16
2.6 ความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามสายส่ง	17
2.7 ค่าคงตัวการลดทอน	20
2.8 การต่อโหลดเข้ากับสายนำสัญญาณ	21
2.8.1 กรณีเมทซ์กับสาย	21
2.8.2 กรณีไม่เมทซ์กับสาย	21
2.8.2.1 กรณีลัดวงจร	22
2.8.2.2 กรณีเปิดวงจร	22
2.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ	22
2.10 ความรู้เบื้องต้นสำหรับ TDR	24
2.10.1 หลักการทำงานของ TDR	25
2.10.2 สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสาย	26
2.10.3 รูปร่างและสัญญาณสะท้อนกลับ	27
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	30
บล็อกไดอะแกรมรวมของระบบ	30
3.1 วงจรแปลงแรงดัน	30
3.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5 V	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 วงจรแปลงแรงดัน +12 V , -12 V , ground	30
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	31
3.3 วงจรเลือกสัญญาณ	32
3.4 วงจรขับสัญญาณ	33
3.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ	33
3.6 วงจรรวมสัญญาณ	34
3.7 วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ	35
3.8 วงจรคูณสัญญาณ	37
3.9 วงจรนับ	37
3.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล	38
3.11 การออกแบบและสร้างวงจรในส่วนที่เป็นดิจิทัลด้วยภาษา VHDL	39
3.11.1 การออกแบบวงจรเชิงเลขด้วยอุปกรณ์ FPGA	39
3.11.2 การออกแบบ โดยใช้ภาษาอธิบายการทำงานของฮาร์ดแวร์	40
3.11.3 การจำลองการทำงานของวงจร	41
3.11.4 การสังเคราะห์วงจร	41
3.11.5 การแบ่งวงจร	41
3.11.6 การวางอุปกรณ์	42
3.11.7 การเชื่อมต่อสัญญาณ	42
3.11.8 การโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA	42
3.12 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์	43
3.12.1 ความแตกต่างของไมโครคอนโทรลเลอร์	43
3.12.2 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	45
3.12.2.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	45
3.12.3 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	47
3.12.4 โครงสร้างและการทำงานของพอร์ต	49
3.12.4.1 การใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต	50
3.12.4.2 การใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุต	52
3.12.4.3 การอ่านค่าลอจิกจากพอร์ต	53
3.12.5 จังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.13 จอแสดงผล	56
3.13.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD	56
3.13.2 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD ในโครงการ	57
3.13.3 คำสั่งควบคุม LCD	58
3.13.4 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD	61
3.13.5 จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล	61
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	63
4.1 การออกแบบวงจร	63
4.1.1 วงจรแปลงแรงดัน	63
4.1.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5 V	63
4.1.1.2 วงจรแปลงแรงดัน +12 V , -12 V , ground	64
4.1.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	65
4.1.3 วงจรเลือกสัญญาณ	68
4.1.4 วงจรจับสัญญาณ	68
4.1.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ	70
4.1.5.1 วงจรตรวจจับพัลส์บวก	70
4.1.5.2 วงจรตรวจจับพัลส์ลบ	71
4.1.6 วงจรรวมสัญญาณ	72
4.1.7 วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ	73
4.1.8 วงจรคูณสัญญาณ	76
4.1.9 วงจรนับ	77
4.1.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล	78
4.1.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์	80
4.1.11.1 ส่วนของฮาร์ดแวร์	80
4.1.11.2 ส่วนของซอฟต์แวร์	82
4.1.12 จอแสดงผล	85
4.2 ผลการทดลองและค่าความผิดพลาด	88
บทที่ 5 วิจารณ์และสรุป	89
5.1 วงจรแปลงแรงดัน	89
5.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5 V	89
5.1.2 วงจรแปลงแรงดัน +12 V , -12 V , ground	89
5.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 วงจรเลือกสัญญาณ	90
5.4 วงจรจับสัญญาณ	90
5.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ	90
5.6 วงจรรวมสัญญาณ	90
5.7 วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ	91
5.8 วงจรคูณสัญญาณ	91
5.9 วงจรนับ	91
5.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล	91
5.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์	92
5.12 สรุปผลการทดลอง	92
5.13 แนวทางการพัฒนา	93
5.14 ภาคผนวก	94
บรรณานุกรม	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงชนิดต่าง ๆ ของสาย	4
2.2 วงจรเสมือนของสายส่ง	5
2.3 สายส่งเส้นคู่	7
2.4 สายโคแอกเชียล	9
2.5 สายส่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำไม่เท่ากัน	10
2.6 สายส่งแบบโคแอกเชียลที่มีตัวนำ 2 ตัว	10
2.7 สายส่งชนิดพิเศษแบบที่ 1	11
2.8 สายส่งชนิดพิเศษแบบที่ 2	11
2.9 แทนวงจรเสมือนของสายส่งยาว Δx ด้วยวงจรสมมาตรแบบ T	13
2.10 การส่งสายสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปให้โหลดผ่านสายส่ง	14
2.11 การลดทอนของกระแสไฟในแต่ละส่วนของสายส่ง	15
2.12 แสดงกรณีไม่แมทช์กับสายนำสัญญาณ	21
2.13 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายดี	25
2.14 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเสีย	25
2.15 รูปสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้าไปในสาย	26
2.16 รูปร่างของสัญญาณสะท้อนกลับ	28
2.17 ขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับ	29
3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงแรงดัน	31
3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	31
3.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเลือกสัญญาณ	32
3.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจับสัญญาณ	33
3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจจับสัญญาณ	33
3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวมสัญญาณ	34
3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ	35
3.8 บล็อกไดอะแกรมของวงจรคูณสัญญาณ	37
3.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมับ	37
3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิทัล	38
3.11 ลักษณะของตัว FPGA และการนำไปใช้งาน	40
3.12 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครโปรเซสเซอร์	44
3.13 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์	44
3.14 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	46
3.15 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ P89C51RD2	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 วงจรภายในของพอร์ตในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2	52
3.17 ไช้เกิดการ ทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	55
3.18 การจัดขาของจอแสดงผล	57
3.19 บล็อกไดอะแกรมรวม	62
4.1(ก) วงจรแปลงแรงดัน 5 V	63
4.1(ข) วงจรแปลงแรงดัน -12 V	64
4.2 ผลการทดลองในส่วนของวงจรแปลงแรงดัน 5 V	64
4.3 ผลการทดลองในส่วนของวงจรแปลงแรงดัน -12 V	65
4.4 ผลการทดลองในส่วนของวงจรผลิตสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 kHz	65
4.5 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	66
4.6(ก) สัญญาณของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ (200 nsec)	67
4.6(ข) สัญญาณของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ (800 nsec)	67
4.6(ค) สัญญาณของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณพัลส์ (3 μ sec)	68
4.7 วงจรเลือกสัญญาณ	68
4.8 วงจรจับสัญญาณ	69
4.9 สัญญาณที่ส่งไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับมาเมื่อปลายสายทดสอบเปิด	69
4.10 สัญญาณที่ส่งไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับมาเมื่อปลายสายทดสอบลัดวงจร	70
4.11 วงจรตรวจจับพัลส์บวก	70
4.12 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับพัลส์บวก เปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต	71
4.13 วงจรตรวจจับพัลส์ลบ	71
4.14 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับพัลส์ลบ เปรียบเทียบสัญญาณอินพุต	72
4.15 วงจรรวมสัญญาณ	72
4.16 สัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณ	73
4.17 วงจรของ D – Flip Flop ที่ทำการแปลงเป็น T – Flip Flop	73
4.18 วงจรทั้งหมดของวงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ	74
4.19 สัญญาณที่ได้จากวงจร T – Flip Flop 1 หรือวงจรตรวจจับเวลา	75
4.20 สัญญาณที่ได้จากวงจร T – Flip Flop 3 หรือวงจรตรวจสอบเปิดหรือลัดวงจร	76
4.21 วงจรคูณสัญญาณ และวงจรผลิตสัญญาณความถี่ 12 MHz	76
4.22 สัญญาณจากออสซิลเลเตอร์ความถี่ 24 MHz	77
4.23 วงจรนับสัญญาณ	78
4.24 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล	78
4.25 วงจรที่เป็นดิจิตอลที่ออกแบบในโปรแกรม MAX+ PLUS II	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ซิปที่รวมวงจรต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม MAX+ PLUS II	79
4.27 แสดงวงจรภายในเครื่อง	81
4.28 ลักษณะภายนอกของเครื่อง	81
4.29 แสดงลักษณะการใช้งานของเครื่อง	82
4.30(ก) โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรม	83
4.30(ข) โฟลว์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรม (ต่อ)	84
4.31 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อเริ่มทำงาน	85
4.32 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อสำหรับเลือกทดสอบสายหระยะจุดเดียว	85
4.33 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลสำหรับเลือกทดสอบแต่ VSWR	85
4.34 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อสำหรับเลือกทดสอบสัมประสิทธิ์สะท้อนกลับ	85
4.35 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อปรับค่าไดอิเล็กทริก	86
4.36 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อสายเคเบิลที่ทดสอบลัดวงจร	86
4.37 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อสายเคเบิลที่ทดสอบขาด	86
4.38 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อแสดงค่า VSWR ที่วัดได้	86
4.39 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่วัดได้	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายส่ง	7
3.1 เงื่อนไขการตรวจจับการเสี่ยของสายจากในส่วนวงจรตรวจสอบสายตีหรือเสี่ย	36
3.2 เงื่อนไขการตรวจจับชนิดการเสี่ยของสายจากในส่วนวงจรตรวจสอบสายเปิดหรือลัดวงจร	36
3.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครโปรเซสเซอร์	45
3.4 รายละเอียดโดยสรุปบางส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ที่ Atmel ผลิตขึ้น และใช้ในการอ้างอิงในรายงานฉบับนี้	47
3.5 หน้าที่พิเศษของพอร์ต 1 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ของ Atmel	50
3.6 คำสั่งควบคุม LCD	58
4.1 Truth Table IC #74LS123	66
4.2 ค่า R และ C ในวงจรในวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์	66
4.3 ผลการทดลองจากเครื่องวัด	88



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการ

ในการหาระยะจุดเสียของสายเคเบิลในอดีต จะต้องใช้เครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการลูป (Loop) และบริดจ์ (Bridge) แล้วเทียบความยาวสายจากค่าความต้านทานที่วัดได้ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ความคลาดเคลื่อนของการวัดที่เกิดจากความต้านทานหน้าสัมผัสและจุดต่อปลายสายเคเบิล ปัจจุบันเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำได้ก้าวหน้าไปมากได้มีการประยุกต์นำสัญญาณแอนะล็อก (Analog) ส่งไปในสายที่จะทำการทดสอบแล้วรับสัญญาณกลับมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลทั้งหมด สามารถใช้วงจรรวมในการทำงานได้ และนำสัญญาณดิจิทัลมาประมวลผล โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งมีขนาดเล็กและราคาถูกลงมาก

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์หาระยะจุดเสียของสายเคเบิลชนิดต่าง ๆ โดยมีความคลาดเคลื่อนของการวัดน้อยที่สุด
- เพื่อนำไปใช้ในภาคสนามได้ โดยพยายามให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- มีจอแสดงผล (LCD)
- สามารถวิเคราะห์จุดเสียและบอกลักษณะการเสียว่าช้อตหรือเปิดวงจรได้
- สามารถวัดสายเคเบิลได้หลายชนิด
- สามารถพกพาและใช้แบตเตอรี่

1.4 ขั้นตอนในการทำโครงการ

- ศึกษาธรรมชาติของสัญญาณพัลส์เมื่อส่งไปในสายส่ง
- ศึกษาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51
- สร้างบล็อกไดอะแกรมของโครงการทั้งหมดอย่างละเอียด
- แบ่งบล็อกไดอะแกรมทั้งหมดออกเป็นส่วน ๆ
- นำแต่ละส่วนมาสร้างเป็นวงจร
- นำทุกส่วนมาต่อรวมกันปรับแต่งให้สามารถมีเอาท์พุท ออกมาได้
- ทดสอบและวัดความคลาดเคลื่อนของการวัด
- สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้เครื่องทำงานได้ตามขอบเขตและเป้าหมายที่ได้วางไว้ และสามารถวัดหาระยะจุดเสียบของสายชนิดต่าง ๆ ได้ รวมทั้งบอกชนิดของการเสียบของสายได้ และสามารถจะคูลักษณะสัญญาณภายในสายเคเบิลที่ออกทางจอแสดงผลได้ ถึงแม้ค่าความผิดพลาดจากการวัดอาจมีผิดพลาดบ้าง แต่จะไม่มากและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ในภาคสนามได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ชนิดของสายส่ง

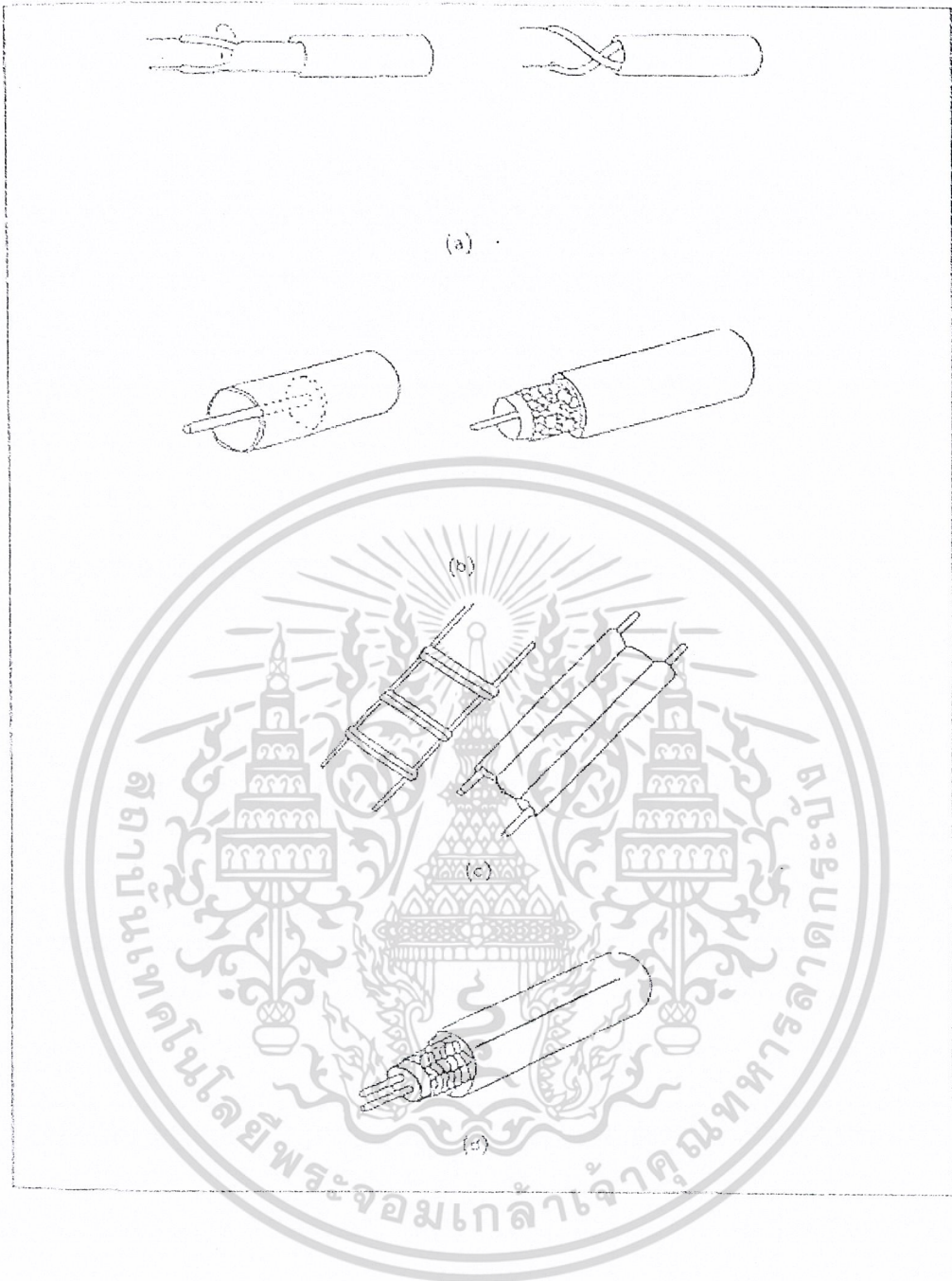
รูปแบบพื้นฐานของสายส่งมีดังนี้

2.1.1 สายคู่แบบบิด (Two Line Twisted) จะเป็นสายที่นิยมใช้มากในการส่งถ่ายพลังงานหรือสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด ซึ่งมีทั้งแบบไม่มีฉลด์และชนิดอิมพีแดนซ์ต่ำ

2.1.2 สายโคแอกเซียล (Coaxial) ประกอบด้วยลวดตัวนำภายใน ตรงแกนกลางและตัวนำภายนอกเป็นรูปทรงกระบอกมีฉนวนชั้นกลาง ส่วนใหญ่มักจะใช้กับเครื่องส่งในย่านความถี่ VHF , UHF ข้อดีของสายโคแอกเซียล คือความสูญเสียของการกระจายพลังงานน้อย ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมิอยู่ภายในช่วงระหว่างตัวนำเท่านั้น แต่ก็มีข้อเสียตรงที่โค้งงอลำบาก ดังนั้นจึงมีการสร้างสายโคแอกเซียลชนิดที่อ่อนตัวง่ายอีกแบบ โดยตัวนำเส้นในจะใช้เป็นเส้นฝอยเส้นเล็ก ๆ รวมกันแทนที่จะเป็นสายเส้นแข็งเส้นเดียว และหุ้มด้วยพลาสติก โพลีเอทไทลีน (Polyethylene) ซึ่งพลาสติกอันนี้จะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริกและกั้นอยู่ระหว่างตัวนำด้านในกับด้านนอก และตัวนำด้านนอกประกอบด้วย สายถักเส้นเล็ก ๆ ถักรอบไดอิเล็กตริก แล้วหุ้มด้วยพลาสติกโพลีวินิล

2.1.3 สายคู่ขนาน (Parallel Spaced หรือ Open – Wire Line) ประกอบด้วยตัวนำสองอันวางขนานกันห่างด้วยระยะทางเท่ากันโดยตลอด โดยใช้ฉนวนวางชั้นเป็นช่วง ๆ เท่ากันตลอด เรียกว่า Bar Insulated สายที่หุ้มฉนวนตลอดแนวขนาดของตัวนำทั้งสองซึ่งเรียกว่า Twin Lead หรือสายริบบอน (Ribbon)

2.1.4 สายคู่ฉลด์ (Two Wire Space And Shielded) ประกอบด้วยตัวนำสองตัวแยกออกจากกัน และจะถูกหุ้มด้วยทองแดงเป็นฉลด์ข้อดีคือตัวนำทั้งสองจะสมดุลเมื่อเทียบกับกราวด์ค่าตัวเก็บประจุระหว่างตัวนำแต่ละตัว โดยมีฉนวนกันสม่ำเสมอตลอดความยาว



รูปที่ 2.1 แสดงชนิดต่างๆ ของสาย

- (a) สายคู่แบบบิด
- (b) สายโคแอกเชียล
- (c) สายคู่ขนาน
- (d) สายคู่ซิงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พารามิเตอร์กระจายของสายส่ง (Distributed Parameter)

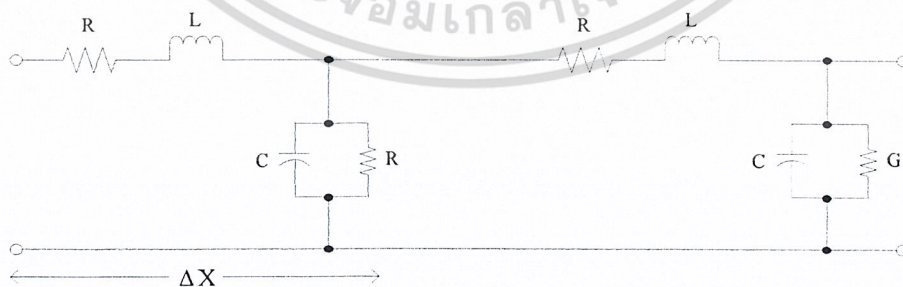
เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของสายส่งชนิดเบื้องต้น จะประกอบด้วยสายตรงสองเส้นขนานกัน ด้วยขนาดและระยะคงที่ แยกจากกันด้วยอากาศหรือฉนวน เราเรียกว่าสายขนาน (Parallel wire) ตัวสายทำมาจากวัสดุตัวนำเช่น ทองแดง หรือ อลูมิเนียม ซึ่งโดยคุณสมบัติแล้วจะมีความต้านทานในตัว และเนื่องจากสายมีขนาดคงที่ ฉะนั้นความต้านทานก็จะมีค่าคงที่ตลอดต่อหน่วยความยาว

ที่ความถี่วิทยุพลังงานบางส่วนจะถูกแผ่กระจายจากสายส่งในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันเป็นพลังงานที่สูญเสียไป หรือเท่ากับว่าความต้านทานของสายมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานของการแผ่กระจาย (Radiation Resistance) ความต้านทานอันนี้หาได้จากค่าของกำลังการแผ่กระจายหารด้วยขนาดของกระแสในสายขกกำลังสอง อย่างไรก็ตามการแผ่กระจายจากสายคู่ขนานจะไม่เกิดขึ้นหากว่าช่วงห่างระหว่างสายทั้งสองน้อยกว่า $1/10$ ของความยาวคลื่นมาก และในที่นี้เราถือว่าไม่มีการแผ่กระจายจากสายส่ง ดังนั้นความต้านทานของการแผ่กระจายก็ตัดทิ้งได้

เมื่อกระแสไหลผ่านสายทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะเชื่อมความเหนี่ยวนำด้วยรูปแบบคงที่ตลอดสาย ผลจากการเหนี่ยวนำของเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดการหน่วงเหนี่ยวการไหลของกระแสเท่ากับมีอินดักแตนซ์ (Inductance) ต่ออนุกรมกับความต้านทานในสาย

สาเหตุที่กระแสวิกฤตกับกระแสเอาต์พุตของสายแตกต่างกัน เนื่องจากมีค่าแอดมิทแตนซ์ (Admittance) อยู่ระหว่างคู่สายซึ่งเราอาจจะมองไม่ชัดเจน ถึงค่าแอดมิทแตนซ์ที่ต่อคร่อมระหว่างสายทั้งสอง ค่าแอดมิทแตนซ์ประกอบด้วยอุปกรณ์สองอย่าง อย่างแรกคือ ค่าความจุ (Capacitance) ซึ่งเกิดขึ้นเพราะสายทั้งสองวางขนานใกล้กันอยู่ระหว่างไดอิเล็กทริก (dielectric) ส่วนอย่างที่สอง เนื่องจากระหว่างสายทั้งสอง ซึ่งมีไดอิเล็กทริกกันอยู่นั้น ไม่ได้เป็นฉนวนที่สมบูรณ์ จึงมีการรั่วไหลของ กระแสระหว่างสายทั้งสองได้ จึงเท่ากับมีตัวนำต่อคร่อมระหว่างสาย

ฉะนั้นเราสามารถเขียนวงจรเสมือนของสายส่ง ที่สายสั้นที่สุดความยาวเท่ากับ ΔX ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่คงที่เหมือนกันตลอดความยาวของสาย และค่าของพารามิเตอร์แบบกระจายต่าง ๆ เหล่านี้ จะเป็นค่าหน่วยต่อความยาวของสาย เช่น หน่วยต่อความยาว 1 ไมล์ หรือ 1 เมตร เป็นต้น



รูปที่ 2.2 วงจรเสมือนของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์แบบกระจาย มีอยู่ 4 ตัวดังนี้

R : คือค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของสาย ซึ่งเท่ากับผลรวมความต้านทานทั้งสองเส้นต่อหน่วยความยาว ohm/m (Ω/m)

L : คือค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสาย ซึ่งเท่ากับผลรวมอินดักแตนซ์ทั้งสองเส้นต่อหน่วยความยาว (H/m)

G : คือค่าคอนดักแตนซ์ ระหว่างสายต่อหน่วยความยาว (mho/m)

C : คือค่าความจุระหว่างสายต่อหน่วยความยาว (F/m)

สำหรับค่า G และค่า C เป็นค่าที่เกิดขึ้นระหว่างสายทั้งสอง จึงไม่ได้เป็นผลรวมของทั้งสองเส้นเหมือนค่า R และ L

ถ้าหากเรากำหนดให้ Z เป็นค่าอิมพีแดนซ์รวมต่อหน่วยความยาวของสาย และ Y เป็นค่าแอดมิตแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสาย จะได้ว่า

$$Z = R + j\omega L \quad (2.1)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (2.2)$$

โดย Z มีหน่วยเป็น โอห์ม/เมตร (ohm/m), Y มีหน่วยเป็น โมห์/เมตร (mho/m) หรือ ซีเมนต์/เมตร (S/m) และ $Z \neq \frac{1}{Y}$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อหน่วยความยาวของสายส่ง ได้แก่ R , L , G และ C นั้นขึ้นกับสายส่งทุกชนิดไม่ใช่เฉพาะคู่ขนานเท่านั้น แต่ค่าของมันในสายแต่ละชนิดอาจแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ ซึ่งโดยปกติบริษัทผู้ผลิต จะบอกถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาให้ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

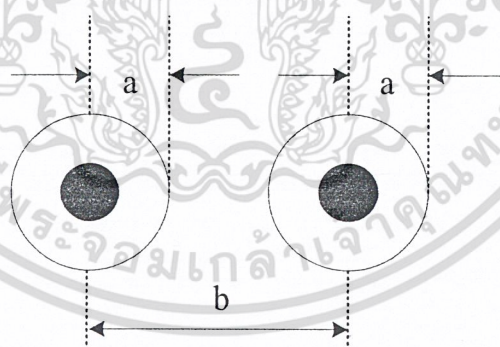
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายส่ง

Type	Gauge miles	Spacing inch	Loop constant/mile			
			R (ohms)	L (mH)	C (μ F)	G (μ mhos)
Open wire	104	12	10.15	3.66	0.00837	0.29
Open wire	104	18	10.15	3.93	0.00797	0.29
Open wire	165	12	4.11	3.37	0.00915	0.29
Open wire	165	18	4.11	3.64	0.00863	0.29
Paper insulate	19*		85.8	1	0.062	1.5
Cable pair	16*		42.1	1	0.062	1.5

* AWG

แต่ถ้าเราทราบคุณสมบัติของวัสดุและลักษณะโครงสร้างของสายก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้
โดยอาศัยสมการจากทฤษฎีสถิติกแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ดังนี้

สายส่งเส้นคู่



รูปที่ 2.3 สายส่งเส้นคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{\pi \epsilon_d}{\cosh^{-1}(b/2a)}$$

$$= \frac{\pi \epsilon_d}{\ln(b/a)} \quad \text{ถ้า } a^2/b^2 \ll 1 \quad (2.3)$$

$$L = \frac{\mu_d}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{b}{2a}\right)$$

$$= \frac{\mu_d}{\pi} \ln\left(\frac{b}{2a}\right) \quad \text{ถ้า } a^2/b^2 \ll 1 \quad (2.4)$$

$$G = \frac{\pi \sigma_d}{\cosh^{-1}(b/2a)}$$

$$= \frac{\pi \sigma_d}{\ln(b/a)} \quad \text{ถ้า } a^2/b^2 \ll 1 \quad (2.5)$$

$$R = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\omega \mu_c}{2\sigma_c}} \quad (2.6)$$

เมื่อ

ϵ_d คือสภาพยอมได้ (Permittivity) ของสารที่อยู่รอบสายส่ง

μ_d คือสภาพให้ซึมได้ (Permeability) ของสารที่อยู่รอบสายส่ง

σ_d คือสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารที่อยู่รอบสายส่ง

σ_c คือสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำที่ใช้สายส่ง

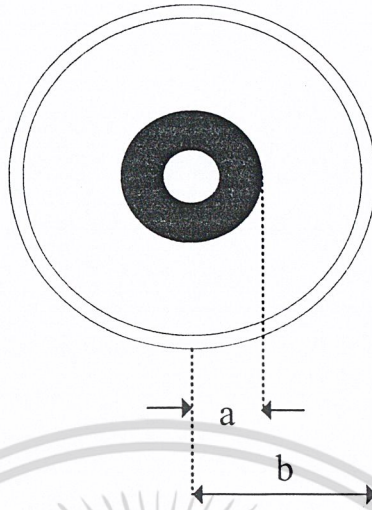
เนื่องจากตัวนำที่ใช้ทำสายส่งไม่ใช่ตัวนำสมบูรณ์ (Perfect conductor) ผลของปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) จะเพิ่มค่า L อีก

$$L_i = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\mu_c}{2\omega \sigma_c}} \quad (2.7)$$

เมื่อ μ_c คือ สภาพให้ซึมได้ของตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งโคแอกเซียล



รูปที่ 2.4 สายโคแอกเซียล

$$C = \frac{2\pi \epsilon_d}{\ln(b/a)} \quad (2.8)$$

$$L = \frac{\mu_d}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.9)$$

$$G = \frac{2\pi \sigma_d}{\ln(b/a)} \quad (2.10)$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_c}{2\sigma_c}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \quad (2.11)$$

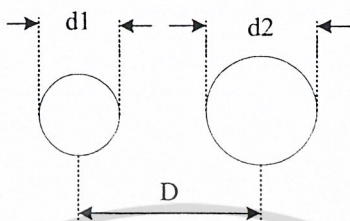
โดยที่ค่าคงตัวที่มีตรรกะด้านล่างเป็น d จะเป็นค่าคงตัวของสารไดอิเล็กทริกที่คั่นตัวนำ และค่าคงตัวที่มีตรรกะด้านล่างเป็น C จะเป็นค่าคงตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง และผลของปรากฏการณ์ทางผิวจะทำให้ L มีค่าเพิ่มขึ้นอีก

$$L_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_c}{2\sigma_c}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งในรูปแบบอื่น ๆ

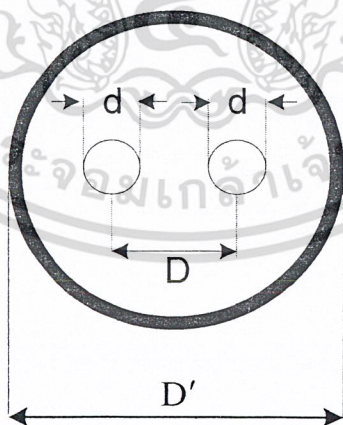
สายส่งในรูปแบบอื่น ๆ ที่แสดงสูตรการคำนวณข้างล่างนี้ได้สมมติว่าสารไดอิเล็กทริกที่อยู่รอบ ๆ เป็นอากาศที่ไม่มีความสูญเสีย ค่าที่คำนวณได้ของ C มีหน่วยเป็น pF/m และ L มีหน่วยเป็น $\mu\text{H/m}$



รูปที่ 2.5 สายส่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำที่ไม่เท่ากัน

$$C = \frac{27.5}{2D \ln \frac{D}{\sqrt{d_1 d_2}}} \tag{2.13}$$

$$L = 0.4 \ln \frac{2D}{\sqrt{d_1 d_2}} \tag{2.14}$$

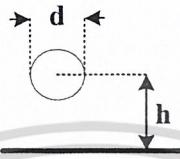


รูปที่ 2.6 สายส่งแบบโคแอกเชียลที่มีตัวนำ 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{27.5}{\ln\left(\frac{2D D'^2 - D^2}{d D'^2 + D^2}\right)} \quad (2.15)$$

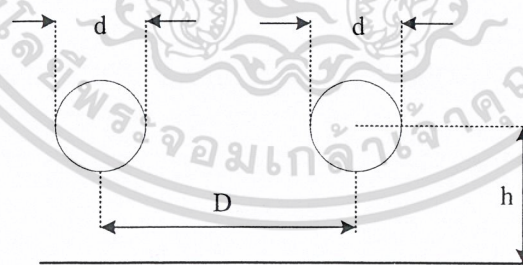
$$L = 0.4 \ln\left(\frac{2D D'^2 - D^2}{d D'^2 + D^2}\right) \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.7 สายส่งชนิดพิเศษแบบที่ 1

$$C = \frac{55}{\ln\frac{4h}{d}} \quad (2.17)$$

$$L = 0.2 \ln\frac{4h}{d} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.8 สายส่งชนิดพิเศษแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{27.5}{\ln \left[\frac{2D}{d \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2}} \right]} \quad (2.19)$$

$$L = 0.4 \ln \frac{2D}{d \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2}} \quad (2.20)$$

2.3 อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายส่ง (Characteristic impedance)

พลังงานของสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่สายส่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพลังงานจะถูกถ่ายทอดสู่โหลดเต็มที่ต่อเมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดแมทซ์กับสาย และหากไม่แมทซ์จะเกิดการสะท้อนกลับของพลังงานบางส่วนในรูปของคลื่นสะท้อน (reflected wave)

หากพิจารณาจากสายส่งสมมติที่มีความยาวไม่มีที่สิ้นสุด (infinite line) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางอินพุตสัญญาณจะไม่มีโอกาสถึงปลายทางเอาท์พุทเลย จึงไม่มีการสะท้อนกลับ ฉะนั้นอัตราส่วนของแรงดัน ต่อกระแส ณ จุดใดๆ ของสายจะมีค่าคงที่ คือ ไม่เกี่ยวกับระยะตำแหน่ง เราเรียกอัตราส่วนนี้ว่า Z_0 (Characteristic impedance)

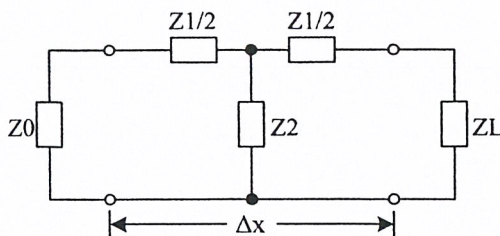
สำหรับสายที่มีความยาวจำกัด (finite line) ถ้าต่อโหลด Z_L ให้มีค่าเท่ากับ Z_0 จะปรากฏเหมือนกับสายที่มีความยาวไม่มีที่สิ้นสุด คือ ไม่มีการสะท้อนกลับเพราะพลังงานถูกถ่ายทอดสู่โหลดเต็มที่ จึงกล่าวได้ว่า อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแส ณ จุดใดๆ ของสายส่งที่ไม่มีการสะท้อนกลับของสัญญาณ

จากวงจรเสมือน (Equivalent) ของสายที่มีความยาว Δx ค่าของอินดักแตนซ์รวมคือ $L\Delta x$ ค่าความต้านทานรวมคือ $R\Delta x$ ค่าคอนดักแตนซ์คือ $G\Delta x$ และค่าความจุคือ $C\Delta x$ ดังนั้นจากสมการที่ 2. และ 2. จะได้ว่า

$$Z\Delta x = (R + j\omega L)\Delta x \quad (2.21)$$

$$Y\Delta x = (G + j\omega C)\Delta x \quad (2.22)$$

เพื่อให้สะดวกขึ้นเราจึงจัดให้อยู่ในรูปของวงจรสมมาตรแบบ T ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แทนวงจรเสมือนของสายส่งยาว Δx ด้วยวงจรสมมาตรแบบ T

$$Z_1 = Z\Delta x \tag{2.23}$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y\Delta x} \tag{2.24}$$

เมื่อพิจารณาจากค่าจำกัดความถี่เราให้ Z_0 เป็น Input impedance ของสายและ $Z_L = Z_0$, หาก $\Delta x \rightarrow 0$, Z_0 นี้ก็คือ characteristic impedance นั้นเอง

$$Z_{in} = Z_0 = Z_L = \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_2 + (\frac{Z_1}{2} + Z_0)}{\frac{Z_1}{2} + Z_2 + Z_0}$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2 + \frac{Z_1^2}{4}} \tag{2.25}$$

แทนค่า 2.23 , 2.24 ใน 2.25

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z\Delta x}{Y\Delta x} + \frac{Z^2 \Delta x}{4}}$$

$$= \sqrt{\frac{Z}{Y} \left[1 + \frac{ZY\Delta Y}{4} \right]}$$

$$Z_0 = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sqrt{\frac{Z}{Y} \left[1 + \frac{ZY\Delta Y^2}{4} \right]}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \tag{2.26}$$

แทนค่า 2.21 , 2.22 ใน 2.26 จะได้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ต่ำซึ่ง $R \gg \omega L$ และ $G \gg \omega C$ เราจะได้ว่า

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{G}} \quad (2.28)$$

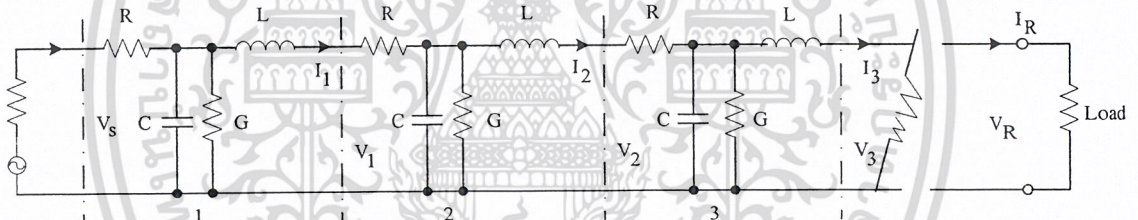
และที่ความถี่สูงหรือในกรณีสายส่งไม่มีการสูญเสียเลย (lossless line) จะทำให้ $R \ll \omega L$ และ $G \ll \omega C$ เราจะได้ว่า

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.29)$$

จะเห็นได้ว่าสองกรณีหลังนี้เป็นค่าจริงไม่มีค่า j จึงไม่ต้องเกี่ยวกับความถี่ และเฉพาะในช่วงระหว่างกรณีนี้เท่านั้นที่ค่า Z_0 เป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน (complex) ขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย

ในทางปฏิบัติเราใช้สมการที่ 2.29 หาค่า Z_0 สำหรับสายคู่ขนาน เมื่อความถี่ 20 KHz ขึ้นไป ส่วนสายโคแอกเซียล เมื่อความถี่ 200 KHz ขึ้นไป

2.4 ค่าคงตัวของการแพร่ (Propagation Constants) ของสายส่ง



รูปที่ 2.10 การส่งสายสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดผ่านสายส่ง

จากรูปที่ 2.10 แสดงวงจรเทียบเท่าของการส่งสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด ซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0 ผ่านสายรับส่ง ซึ่งแบ่งเป็นส่วน ๆ จำนวนหนึ่ง ความต้านทานที่ต่ออนุกรม (Series Impedance) เท่ากับ $R + j\omega L$ และ ความนำไฟฟ้าที่ต่อขนาน (Shunt Admittance) เท่ากับ $G + j\omega C$ ในแต่ละส่วนของสายจะมีผลแสดงต่อกระแสไฟสัญญาณ (หรือแรงดัน) ที่ไหลผ่านมันไปดังนี้

1. กระแสไฟสัญญาณ (หรือแรงดัน) จะถูกลดทอนในแต่ละส่วนของสายรับส่งเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน กล่าวคือ กระแสไฟด้านส่ง ที่ไหลเข้าสายรับส่งส่วนที่ 1 จะถูกลดทอนด้วย Series Impedance และถูกตัดผ่าน Shunt Admittance เหลือกระแสไฟ I_1 ที่ไหลไปเข้าส่วนที่ 2 เป็นจำนวนน้อยลง โดยสมมติว่า

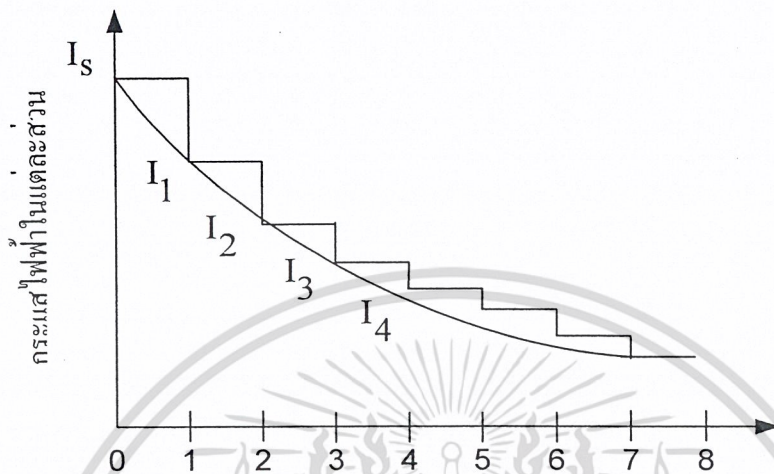
$$\frac{I_s}{I_1} = K \quad \text{ซึ่งในทำนองเดียวกัน}$$

$$\frac{I_1}{I_1} = K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I_2}{I_3} = K \quad \text{และต่อ ๆ ไป}$$

$$\frac{I_s}{I_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_2}{I_3} = \dots = K$$



รูปที่ 2.11 การลดทอนของกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วนของสายส่ง

จากรูปที่ 2.11 แสดงการลดทอนของกระแสไฟฟ้าในแต่ละส่วนของสายรับส่ง ในกรณีที่เราแทนแต่ละส่วนของสายรับส่งด้วย R, L, C และ G ที่เป็นกลุ่มก้อน (Lump) ดังในรูป การลดลงของกระแสไฟฟ้าผ่านสายรับส่งจะเป็นขั้น ๆ โดยมี $\frac{I_s}{I_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_2}{I_3} = \dots = K$ ดังแสดงด้วยกราฟเส้นที่เป็นขั้นบันได

ในทางปฏิบัติ ค่า R, L, C และ G ของสายส่งจะไม่เป็นกลุ่มก้อนแต่จะกระจาย (Distribute) ไปทั่ว การลดลงของกระแสไฟจะเป็นขั้นละน้อยมาก ทำให้กราฟของกระแสไฟลดลงอย่างสม่ำเสมอแสดงด้วยเส้นโค้งดังรูป

2. กระแสไฟสัญญาณ (หรือกำลังต้น) จะถูกเลื่อนเฟสในแต่ละส่วนของสายรับส่งเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน เพราะคลื่นต้องการเวลาในการเดินทางจำนวนหนึ่งในการเดินทางผ่านไป คุณสมบัติซึ่งสายรับส่งมีต่อสัญญาณที่ส่งผ่านมันในเรื่องการลดทอนกำลัง (Attenuation) และการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ในแต่ละส่วนของหนึ่งหน่วยความยาว เราเรียกว่า Propagation Constant ซึ่งแทนด้วย γ

$$\gamma = \ln \frac{I_2}{I_3} = \ln \frac{I_1}{I_2}$$

เนื่องจาก I_1 น้อยกว่า I_s และมีเฟสตามหลัง I_s ดังนั้น γ ซึ่งเท่ากับ $\ln \frac{I_s}{I_1}$ จะประกอบด้วย 2

ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นค่าตัวเลขจริงแสดงจำนวนของการลดทอนกำลัง และอีกส่วนหนึ่งเป็นค่าจินตภาพ (Imaginary) แสดงจำนวนการเลื่อนเฟสของสัญญาณระหว่าง I_s และ I_1 นั่นคือ

$$\gamma = \ln \frac{I_s}{I_1}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.30)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.31)$$

- α เรียกว่า ค่าคงตัวของ การลดทอน (Attenuation Constant) กำหนดไว้เป็น Neper หรือ dB ต่อหนึ่ง หน่วยความยาว เช่น 1 ไมล์

- β เรียกว่า ค่าคงตัวของเฟส (Phase Constant) กำหนดไว้เป็นเรเดียนต่อหนึ่งหน่วยความยาว เช่น 1 ไมล์ เป็นต้น

2.5 ความยาวและความเร็วของคลื่นจรบนสายส่ง

เมื่อมองดูคลื่นจรไปตามสายส่งที่เวลาขณะใดขณะหนึ่ง ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุด 2 จุดตามความยาวของคลื่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครบหนึ่งรอบคลื่นพอดี หรือระยะทางที่เฟสของคลื่นเปลี่ยนไป 2π เรเดียน เราเรียกระยะทางนี้ว่าความยาวคลื่น (wavelength) เมื่อ β เป็นค่าที่บอกการเปลี่ยนแปลงของเฟสในคลื่นต่อหนึ่งหน่วยความยาว ถ้าเราให้ λ เป็นความยาวคลื่น ตามบทนิยามของความยาวคลื่น

นั่นคือ

$$\beta\lambda = 2\pi$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad \text{หรือ} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.32)$$

เมื่อเวลาผ่านไป เราจะสังเกตเห็นคลื่นจรเคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่ง ด้วยความเร็ว (velocity) ค่าหนึ่งซึ่งเราสามารถวัดได้โดยหารระยะทางที่เฟสที่คงที่เฟสหนึ่งของคลื่นเดินทางไปได้ในหนึ่งหน่วยเวลา ถ้าพิจารณาคลื่นจรตกกระทบที่เวลา $t = t_1$ ที่จุด $x = x_1$ เฟสที่เวลาและจุดนี้คือ $\omega t_1 - \beta x_1$ เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t_2 เฟสเดิมนี้อาจย้ายไปอยู่จุดใหม่ให้จุดนี้เป็น x_2 ดังนั้นที่จุด x_2 ที่เวลา t_2 จะมีเฟสเป็น $\omega t_2 - \beta x_2$ และตามสมการมีเฟส $\omega t_1 - \beta x_1$ และตามสมการมีเฟส $\omega t_2 - \beta x_2$ ดังนั้น

$$\omega t_2 - \beta x_2 = \omega t_1 - \beta x_1 \quad (2.33)$$

เฟสคงที่นี้เคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง x_2, x_1 ในเวลา t_2, t_1 จะได้ความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.34)$$

ปกติแล้วมักจะใช้ v เป็นสัญลักษณ์แทนความเร็ว แต่เนื่องจากจะไปตรงกับสัญลักษณ์ของแรงดัน จึงเลี่ยงมาใช้สัญลักษณ์ U แทน

เมื่อ ω และ β

$$u = \frac{2\pi f}{\beta} = \lambda f \quad (2.35)$$

ความเร็วที่หาได้นี้เป็นความเร็วของเฟสที่คงที่ของคลื่นจร เราเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเฟส (Phase velocity) ถ้าเครื่องกำเนิดให้สัญญาณเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยสัญญาณไซน์ชอยด์หลาย ๆ ความถี่ แล้วเรายังจะมองเห็นรูปแบบคลื่นรวมของสัญญาณเชิงซ้อนที่เคลื่อนไปด้วยความเร็วซึ่งแตกต่างจากความเร็วเฟสอีกด้วย ซึ่งเราเรียกว่าความเร็วกลุ่ม (group velocity)

2.6 ความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามสายส่ง

ความเร็วของคลื่นที่แพร่หรือเคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่งจะเป็นค่าคงที่ ความถี่และค่าคงตัวของสัญญาณบนสายส่งจะมีความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับความเร็ว ดังนี้

$$u = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.36)$$

ω ขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ใช้ว่ามีความถี่เท่าไร ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องกำเนิด ω เป็นค่าคงที่ที่กำหนดโดยผู้ใช้ แต่ค่าคงตัวเฟสเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสายส่ง เกี่ยวข้องกับระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปเมื่อเทียบกับเวลาที่สัญญาณเปลี่ยนไปหนึ่งรอบ นั่นคือความถี่ของสัญญาณ

เพื่อให้การวิเคราะห์ในที่นี่ง่ายขึ้น ให้เริ่มด้วยสายส่งไร้ความสูญเสีย จากสมการค่าคงตัวการแพร่สมการที่ 2.30 และ 2.31 จะได้ว่า

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

ถ้าการใช้มีเงื่อนไขที่ทำให้ $R \ll \omega L$ และ $G \ll \omega C$ เราจะพบว่า

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (2.37)$$

เมื่อแทน 2.37 ใน 2.36 จะพบว่า

62102

$$u = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.38)$$

เมื่อแทนค่า L และ C ในว่าสายส่งนั้น จะเป็นสายเส้นคู่หรือสายส่ง โคนแอกเซียลก็ตามจะพบว่า

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu_d \epsilon_d}} \quad (2.39)$$

โดยที่ μ_d คือสภาพให้ซึมได้ของสารที่อยู่รอบตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง ใช้อธิบายสายส่งทางแม่เหล็ก และ ϵ_d คือสภาพยอมได้ของสารที่อยู่รอบตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง ใช้อธิบายสมบัติทางไฟฟ้าจากสมการนี้พบว่าความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามสายส่งขึ้นกับสมบัติของสารที่อยู่รอบ ๆ ตัวนำที่ใช้ทำสายส่งไม่ขึ้นกับตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง เพราะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น กระจายอยู่ภายนอกของตัวนำที่ใช้ทำสายส่ง และคลื่นเคลื่อนที่ไปในสารที่อยู่รอบ ๆ โดยทิศทางเคลื่อนที่ถูกนำ (Guide) ไปในทิศทางตามความยาวของตัวนำของสายส่ง

ปกติแล้วการบอกสภาพให้ซึมได้และสภาพยอมได้ของสารใด ๆ มักจะระบุได้ดีกว่าหรือเลวกว่า สหุณยากาศเป็นก็เท่า ดังนี้

$$\mu_d = \mu_r \mu_0 \quad (2.40)$$

$$\epsilon_d = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.41)$$

μ_r เรียกว่า สภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ของสาร ใช้อธิบายว่าสารนี้มีสภาพให้ซึมได้เป็นกี่เท่าของสหุณยากาศ สำหรับสหุณยากาศ μ_r มีค่าเท่ากับ 1

μ_0 คือ สภาพให้ซึมได้ของสหุณยากาศ มีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ϵ_r เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (Relative dielectric constant) ของสาร มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับสหุณยากาศ

ϵ_0 คือ สภาพยอมได้ของสหุณยากาศ มีค่า 8.854 pF/m

เช่น สารพอลิเอทิลีน มีค่า $\epsilon_r = 2.2$ หมายความว่าสารนี้มีสภาพยอมได้ต่อสนามไฟฟ้าดีกว่าสหุณยากาศ 2.2 เท่า ตามปกติแล้วสารไดอิเล็กทริกที่เป็นฉนวนไฟฟ้าโดยทั่วไปจะไม่เป็นสารแม่เหล็กและจะมีสภาพให้ซึมได้ของสารใกล้เคียงกับสหุณยากาศ จึงมี $\mu_r = 1$

เมื่อแทน μ_d และ ϵ_d ลงในสมการที่ 2.39 จะได้ความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามความยาวของสายส่ง ดังนี้

$$u = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r \mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเร็วของคลื่น ที่เคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่งซึ่งมีสุญญากาศอยู่รอบ ๆ ตัวนำที่ทำสายส่งจะมีค่า

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.43)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับความเร็วของแสงหรือความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{400\pi \times 10^{-9} \times 8.854 \times 10^{-12}}} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

ดังนั้นเขียนสมการ 2.43 ได้ใหม่คือ

$$u = \frac{u_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2.44)$$

โดยทั่วไป ฉนวนไฟฟ้าเป็นสาร ไดอิเล็กทริกที่มีค่า $\mu_r \cong 1$ เราจึงสามารถหาความเร็วของคลื่นที่แพร่ไปตามความยาวของสายส่ง โดยเฉพาะสายส่งเส้นคู่และสายส่งโคแอกเซียล ได้ดังนี้

$$u = \frac{u_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m/s} \quad (2.45)$$

ตัวประกอบความเร็ว (Velocity factor) บางครั้งอาจเรียกว่าอัตราส่วนความเร็ว (Velocity ratio) ของสายส่งคือค่าที่ใช้บอกว่าการเคลื่อนที่บนสายส่งมีความเร็วเป็นกี่เท่าของความเร็วของแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ ดังนี้

$$VF = \frac{u}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ m/s} \quad (2.46)$$

หรือ

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.47)$$

เนื่องจากสารไดอิเล็กทริกโดยทั่วไปจะมีค่า ϵ_r มากกว่า 1 จึงทำให้ VF มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าสายส่งที่มีบริเวณโดยรอบของตัวนำที่ใช้ทำสายส่งเป็นสารไดอิเล็กทริก นอกเหนือจากเป็นสุญญากาศแล้ว ความเร็วของคลื่นที่ไปตามความยาวของสายส่งจะมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วของแสงในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ค่าคงตัวการลดทอน

ในความเป็นจริงแล้วจะไม่มีสายส่งไร้ความสูญเสีย เพียงแต่ว่าภายใต้เงื่อนไขบางกรณีสามารถพิจารณาสายส่งให้เสมือนว่าไร้ความสูญเสียได้ เช่น กรณีความถี่สูงในย่านความถี่วิทยุ ฯลฯ ส่วนในย่านความถี่ต่ำ เช่น ความถี่ในย่านความถี่เสียงในสายโทรศัพท์ ความถี่ 50 Hz ในระบบไฟฟ้ากำลัง ฯลฯ จะไม่สามารถพิจารณาภายใต้เงื่อนไขนี้ได้ และจะต้องวิเคราะห์ตามสมการที่ไม่มีการสมมติ

การระบุว่าสายส่งไร้ความสูญเสีย จะมีความหมายว่าค่าคงตัวการลดทอน α มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่สายส่งในความเป็นจริงแล้ว ถึงแม้จะใกล้เคียงสายส่งไร้ความสูญเสีย แต่ค่าคงตัวการลดทอนก็ไม่ได้เป็นศูนย์ เพียงแต่อาจมีค่าต่ำมาก ถึงกระนั้นก็ตาม ถ้าสายส่งที่ใช้งานมีความยาวพอสมควรก็จะพบว่าค่าการลดทอนเป็นศูนย์อาจผิดไปจากความเป็นจริงได้มาก ดังนั้นแม้การลดทอนมีค่าต่ำมากก็ยังคงต้องนำมาคำนวณด้วย ในกรณีที่สายส่งมีความยาวมาก ในขณะที่อิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะและความเร็วคลื่นจรบนสายส่งที่หาได้จากการสมมติว่าเป็นสายส่งไร้ความสูญเสียยังคงใช้ได้อยู่

พลังงานในสัญญาณไฟฟ้าขณะที่เคลื่อนที่ไปตามความยาวของสายส่งก่อนถึงโหลด อาจมีบางส่วนเปลี่ยนรูปพลังงานไปเป็นอย่างอื่น ในแง่ของสัญญาณไฟฟ้าที่เราต้องการนั้นถือว่าเกิดการสูญเสียไปในสายส่งอาจเป็นไปได้สามทาง คือ เกิดการแผ่พลังงาน (Radiation) ออกนอกสายส่ง เกิดความร้อนขึ้นในตัวนำ (Conductor heating) และเกิดความร้อนขึ้นในตัวสาร ไดอิเล็กทริก (Dielectric heating)

การสูญเสียเนื่องจากเกิดการแผ่พลังงานตัวสายส่ง จะทำตัวเหมือนกับเป็นสายอากาศ (Antenna) จะมีพลังงานบางส่วน ในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบตัวนำของสายส่งแผ่เคลื่อนที่กระจายไกลออกไปในอากาศรอบ ๆ จึงดูเหมือนว่ามีพลังงานส่วนหนึ่งแผ่จากสายส่งออกไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสายส่งเส้นคู่จะมีการสูญเสียเนื่องจากการแผ่พลังงานมากกว่าสายส่งโคแอกเชียล การแผ่พลังงานจะยิ่งมาก ถ้าระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองที่ใช้ทำสายส่งยิ่งมาก การหาค่าความสูญเสีย เนื่องจากการแผ่พลังงานโดยการวิเคราะห์หาค่าทำได้ยาก โดยทั่วไปจะหาโดยวิธีการวัดความสูญเสียจะยิ่งมากถ้าความถี่ใช้งานสูงขึ้น

การสูญเสียอันเนื่องมาจากการเกิดความร้อนขึ้นในตัวนำ บางครั้งเรียกว่าการสูญเสีย I^2R จะแปรผันโดยตรงกับกระแสที่กำลังไหลอยู่ในตัวนำ ในขณะที่เดียวกัน ความสูญเสียนี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความถี่การใช้งานสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ เกิดจากสิ่งที่เรียกว่าปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect) กล่าวคือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลไปตามตัวนำ กระแสจะมามีออกกันอยู่ได้ผิวของตัวนำ ยิ่งลึกจากผิวตัวนำเข้าไปกระแสจะยิ่งน้อยลงความถี่ยิ่งสูงขึ้นกระแสก็จะยิ่งขึ้นมาอยู่ได้ผิวมาก จึงทำให้ความต้านทานของสายส่งต่อหนึ่งหน่วยความยาวไม่คงที่เมื่อเทียบกับความถี่ของสัญญาณ

สำหรับการสูญเสียอันเนื่องมาจากการเกิดความร้อนขึ้นในตัวสาร ไดอิเล็กทริกที่อยู่รอบ ๆ สายส่งนั้นจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันที่เกิดขึ้นบนสายไดอิเล็กทริกและความถี่ อย่างไรก็ตามจะไม่มี ความสูญเสียกรณีนี้ในสุญญากาศ รวมทั้งในอากาศที่ไม่มีความชื้นก็จะมี ความสูญเสียกรณีนี้ต่ำมาก สายส่งสองเส้นที่มีตัวนำที่เท่ากัน สายส่งที่ใช้อากาศเป็นสาร ไดอิเล็กทริก จะมีความสูญเสีย เนื่องจากการเกิดความร้อนขึ้นในตัวสารไดอิเล็กทริกต่ำกว่า เมื่อใช้สาร ไดอิเล็กทริกชนิดอื่น ๆ

ดังนั้น ค่าคงตัวการลดทอนของสายส่งจึงไม่คงที่ เมื่อเทียบกับความถี่ ผู้ผลิตมักจะเป็นผู้ให้ค่าคงตัวการลดทอนมาในรูปความสูญเสียเป็นหน่วยเดซิเบลต่อหน่วยความยาวบนตารางหรือกราฟ พร้อมกับระบุความถี่ แต่เนื่องจากมักมีค่าต่ำ จึงอาจให้มาเป็นหน่วยเดซิเบลต่อความยาวมาก ๆ เช่น เป็นเดซิเบลต่อหนึ่งพันเมตร ฯลฯ ก็ได้

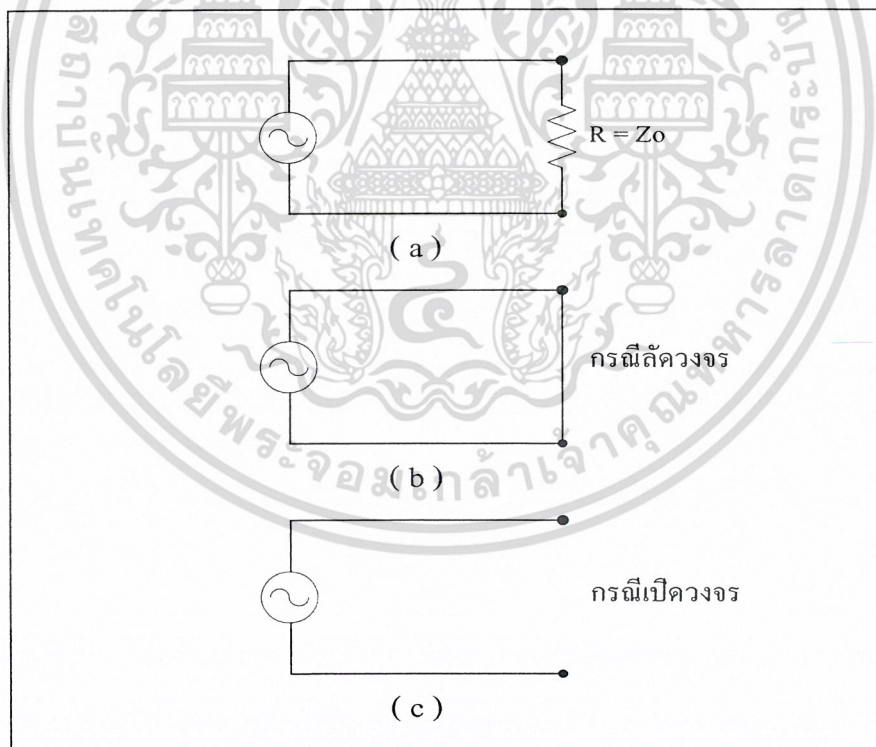
2.8 การต่อโหลดเข้ากับสายนำสัญญาณ

2.8.1 กรณีแมทช์กับสาย

ถ้าเราต่อความต้านทานขนาดเท่ากับอิมพีแดนซ์ของสายเราเรียกการต่อลักษณะนี้ว่า “แมทช์” ในสายส่งที่แมทช์ค่าพลังงานที่ส่งจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดจะถูกดูดกลืนหายไปที่โหลดหมด ไม่มีการสะท้อนพลังงานกลับไป ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียพลังงานบนสายเรียกได้ว่า มีการถ่ายทอดพลังงานอย่างสมบูรณ์ ถ้าเรากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดเท่ากับ D^2/Z_0 และ I^2Z_0 ตามลำดับ

2.8.2 กรณีไม่แมทช์กับสาย

ถ้าต่อความต้านทานที่ขนาดไม่เท่ากับ เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “ไม่แมทช์”



รูปที่ 2.12 แสดงกรณีไม่แมทช์กับสายนำสัญญาณ

- (a) โหลดที่ต่อมีค่าไม่เท่ากับ Z_0
- (b) ลัดวงจร (short - circuit line)
- (c) เปิดวงจร (open - circuited line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มาถึงโหลด จะไม่ถูกดูดกลืนจนหมด (ต่างจากกรณี ที่พลังงานหายไปในโหลดจนหมด) ทำให้เหลือพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดเหมือนกับการปาลูกบอลไปกระทบกำแพง ซึ่งการเกิดสภาวะ “ไม่แมทซ์” ระหว่างสายส่งกับ โหลดมากขึ้นค่าพลังงานที่สะท้อนกลับมาก็จะมากขึ้นด้วย พลังงานทั้งหมดที่มาถึงโหลดถูกสะท้อนกลับมาหมด มี 2 กรณีคือ

2.8.2.1 กรณีลัดวงจร

กำหนดไว้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเท่ากับศูนย์ นั่นคือ แรงดันสะท้อนกลับมีขนาดเท่ากันแต่มีเฟสตรงข้ามจะทำให้ผลรวมเท่ากับศูนย์ได้

2.8.2.2 กรณีเปิดวงจร

กำหนดไว้ว่ากระแสที่โหลดต้องเท่ากับศูนย์แสดงว่ากระแสที่สะท้อนกลับต้องมีเฟสต่างกับกระแสที่เดินทางมายัง โหลดอยู่ 180 องศา และมีขนาดเท่ากันในทำนองเดียวกัน กรณีลัดวงจร ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สะท้อนกลับต้องมีเฟสเหมือนกับส่วนที่เดินทางมาจาก โหลด (ขนาดเท่ากัน) ทำให้เกิดการเสริมกันของแรงดันไฟฟ้า

สำหรับกรณีที่มีโหลดต่ออยู่และขนาดไม่เท่ากับ Z_0 พบว่าพลังงานบางส่วนสะท้อนกลับจากโหลดและมีขนาดน้อยกว่าด้วย เราแยกพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

- กรณี R น้อยกว่า Z_0 แรงดันไฟฟ้าส่วนที่สะท้อนกลับมีเฟสต่างกับที่เดินทางมา โหลดอยู่ 180 องศา (เหมือนกับกรณีวงจร) แต่มีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดไม่ได้หายไปทีโหลด

- กรณี R มากกว่า Z_0 กระแสไฟฟ้าส่วนที่สะท้อนกลับมีเฟสต่างกับที่เดินทางมา โหลดอยู่ 180 องศา (เหมือนกรณีเปิดวงจร) แต่มีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากกระแสทั้งหมดไม่ได้หายไปทีโหลด

2.9 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient) และ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR)

ในกรณีทำสายส่งมีทั้ง คลื่นที่เดินทางอยู่ (Traveling wave) และ คลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflection wave) ปนกันอยู่ ซึ่งก็คือสายส่งที่เกิดการชำรุดหรือสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสายส่งมีค่าไม่เท่ากันทั้งสายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการแสดงคุณสมบัติการสะท้อนกลับ ณ จุดใดจุดหนึ่งนั้น แสดงโดยอัตราส่วนระหว่างคลื่นทั้งสอง และเรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งจะได้ว่า

$$\rho = \frac{V_r}{V_i}$$

V_r คือคลื่นที่สะท้อนกลับมา ณ จุดนั้น ๆ

V_i คือคลื่นที่เดินทางหรือตกกระทบที่จุดนั้น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าเท่ากับ

$$\rho = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0}$$

Z_R คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ณ จุดนั้น ๆ

Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะเฉพาะของสาย

ซึ่งถ้าเราพิจารณา จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดใด ๆ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปมากแค่ไหน โดยปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เช่น

- ถ้า $Z_R = Z_0$ คือกรณีที่อิมพีแดนซ์เท่ากันทั้งสาย จะทำให้ $\rho = 0$ คือไม่มีการสะท้อนกลับของสัญญาณเกิดขึ้น

- ถ้า $Z_R = 0$ คือกรณีที่โหลดมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือเกิดการลัดวงจรภายในสายส่งสัญญาณ จะทำให้ $\rho = -1$ คือ สัญญาณสะท้อนกลับ 100% เนื่องจาก $V_r = -V_i$ จึงเป็นคลื่นสะท้อนกลับแบบลบ (Negative return pulse)

- ถ้า $Z_R = \infty$ คือกรณีที่เกิดโหนดมีค่าเท่ากับอนันต์ หรือเกิดการขาดของสายส่งสัญญาณ จะทำให้ $\rho = 1$ คือสัญญาณสะท้อนกลับ 100% เนื่องจาก $V_r = V_i$ จึงเป็นคลื่นสะท้อนกลับแบบบวก (Positive return pulse)

ในสายส่ง ณ ที่จุดใด ๆ ก็ตามผลรวมของ Traveling wave และ Reflected wave นี้ดูเหมือนว่าจะเป็นคลื่นเดียวที่อยู่กับที่ โดยไม่ค้ำนิ่งถึงเวลา ซึ่งเรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นนิ่ง (Standing wave) ซึ่งอัตราส่วนของแรงดันสูงสุดต่อแรงดันต่ำสุด เรียกว่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r}$$

และจะมีความสัมพันธ์กับค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับดังนี้

$$VSWR = \frac{1 + \frac{V_r}{V_i}}{1 - \frac{V_r}{V_i}}$$

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

$$|\rho| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ความรู้เบื้องต้นสำหรับ TDR (Time Domain Reflectometer)

TDR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบ่งบอกตำแหน่งจุดเสียหายของสายเคเบิล ซึ่งมีเวลานานแล้ว และยังคงเป็นวิธีการที่รวดเร็วและถูกต้องมากที่สุด ในอดีตจะมีเพียงบริษัทใหญ่ ๆ และวิศวกรในระดับสูงเท่านั้นที่มีโอกาสได้ใช้เครื่องมือนี้ เนื่องจากความซับซ้อนในการใช้งานและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ในช่วงต้นปี 1980 TDR ได้เริ่มที่จะนำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจัง ๆ จัง ๆ เมื่อบริษัท Riser Bond Instruments ได้พยายามที่จะพัฒนา TDR รุ่นแรกขึ้นและทำต่อเรื่อย ๆ มาจนกระทั่งปัจจุบัน TDR ระบบดิจิทัล ได้เป็นเครื่องมือระดับมาตรฐานสำหรับช่างเทคนิคระดับต้นไปแล้ว

เครื่องมือชนิดนี้ได้ใช้เทคนิคใหม่ในการวัดระยะหาตำแหน่งเสียหายของสายตัวนำ ซึ่งแตกต่างจากระบบเก่าอย่างสิ้นเชิง เดิมเครื่องมือวัดหาตำแหน่งเสียหายของสายเคเบิลใช้หลักการของบริดจ์ (Bridge) ซึ่งจะวัดค่าความต้านทานหรือค่าความจุไฟฟ้าของสาย แต่ TDR จะทำงานคล้ายกับสัญญาณ เรดาร์ โดยจะทำการส่งสัญญาณพัลส์ เข้าไปในสายเคเบิล เมื่อเดินทางไปถึงปลายสายหรือพบจุดเสียหายของสายเคเบิลเนื่องจากสภาพและคุณสมบัติทางสายตรงตำแหน่งนี้มีการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ตรงตำแหน่งนั้นไม่แมทช์ (Mismatch) กับอิมพีแดนซ์ของสาย (Characteristic Impedance or Cable Impedance) สัญญาณพัลส์ที่ส่งไปนั้นก็สะท้อนกลับไปที่เครื่องวัด แล้วก็ทำการตรวจสอบเวลาที่สัญญาณเดินทางไปและกลับ แล้วทำการแปลงช่วงเวลานี้ให้เป็นระยะทางต่อจากนั้นก็ทำการแสดงผลต่อไป บางครั้งอาจจะเรียกเครื่องมือชนิดนี้ว่า Pulse Echo Tester หรือ Pulse Reflection Instrument

เราสามารถแบ่งชนิดของ TDR ออกเป็น 2 ประเภทตามการแสดงผล ดังนี้

1. ชนิดแสดงผลโดยใช้รูปคลื่นจริงที่สะท้อนกลับให้ปรากฏบนจอภาพ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันในวันแรก ๆ โดยจะแสดงรูปพัลส์ที่ส่งออกไปและที่สะท้อนกลับบนหน้าจอ จากนั้นผู้วัดจึงนำรูปสัญญาณที่วัดได้ไปประมวลผลเพื่อทราบตำแหน่งจุดเสียหาย หรือชนิดของการเสียหายที่เกิดขึ้นต่อไป
2. ชนิดแสดงผลโดยใช้ตัวเลขในการบอกตำแหน่งระยะทางของจุดเสียหาย วิธีนี้ในปัจจุบันนิยมใช้กันมาก เพราะสามารถบ่งบอกความเสียหายได้โดยและสามารถเข้าใจได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะได้นำเทคโนโลยีด้านดิจิทัลเข้ามาช่วยในการประมวลผลและแสดงผล นอกจากนี้ยังสามารถแสดงชนิดของการเสียหายอื่น ๆ ได้อีก เช่น เกิดการฉีก หรือ ขาด ที่จุดเสียหาย และสภาวะที่เกิดเป็นแบบ อิมพีแดนซ์สูง หรือ อิมพีแดนซ์ต่ำ

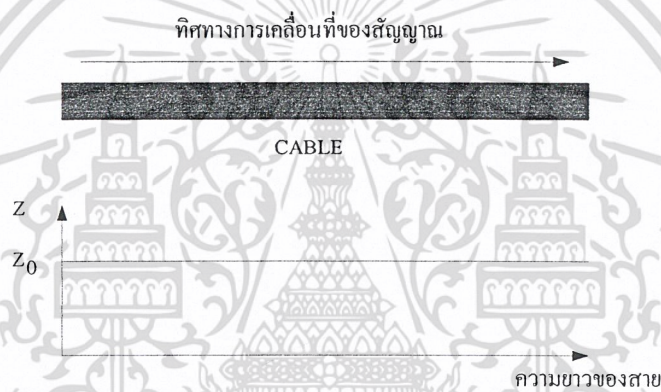
ในวิธีที่ 1 สามารถบ่งบอกข้อมูลได้มากกว่าวิธีที่ 2 แต่วิธีที่ 2 สามารถทำงานได้ง่าย และ สะดวกกว่ามาก ดังนั้นเครื่องมือส่วนใหญ่ จึงใช้แบบวิธีที่ 2 นี้

นอกจากนี้ TDR สามารถตรวจวัดตัวนำโลหะประเภท สายคู่และสายโคแอกเชียล ได้ และยังสามารถที่จะตรวจวัดความเสียหายเพียงเล็กน้อย ๆ ที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลได้ เช่น ตัวนำที่เสื่อมสภาพ การสึกกร่อนจากน้ำ ฉนวนที่หุ้มตัวนำเกิดการเสียหาย ฯลฯ ได้ และแม้ว่าเครื่องมือที่เราใช้อยู่ในปัจจุบันนี้จะง่ายและถูกต้องก็ตาม เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการทำงานเช่นเดียวกับอุปกรณ์อื่น ๆ เราควรทำความเข้าใจหลักการการทำงานของ TDR ให้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น

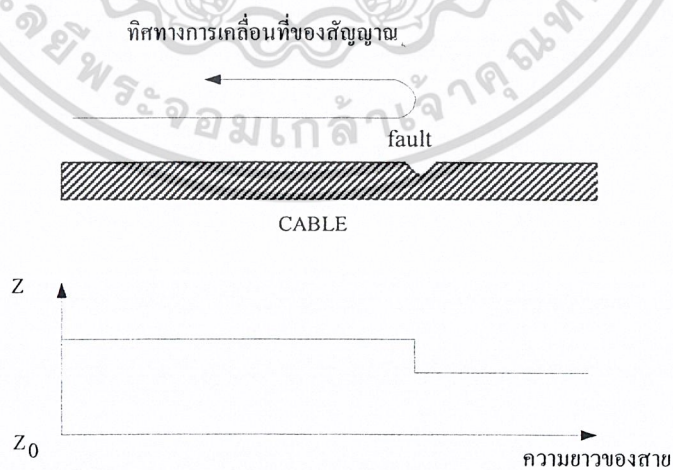
2.10.1 หลักการทำงานของ TDR

เมื่อตัวนำ 2 เส้นนำมาวางใกล้กันจะก่อให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ขึ้น TDR จะตรวจหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าอิมพีแดนซ์ ของสายขึ้นอยู่กับค่าระยะห่างระหว่างตัวนำและค่าของไดอิเล็กทริกนี้ ถ้าสายถูกคั่นด้วยระยะทางที่คงที่และค่าไดอิเล็กทริกที่คงที่แล้วสายเคเบิลจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่คงที่และถ้าค่าระยะห่างไม่แน่นอน ค่าของจนวนเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงไปด้วย

โดยปกติแล้วสายส่งสัญญาณแต่ละชนิดจะมีค่าอิมพีแดนซ์คงที่ตลอดความยาวสาย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายมีค่าคงที่ดังนั้นถ้าเราทำการส่งสัญญาณตรวจสอบเข้าไปในสายสัญญาณจะเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวสาย โดยจะไม่มีการสะท้อนกลับมาของสัญญาณเลย และถ้าหากว่าส่วนใดของสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งหมายถึงตำแหน่งที่สายส่งสัญญาณเกิดการชำรุด จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณที่ตำแหน่งนั้น ๆ



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายตี



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของสัญญาณในสายเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TDR จะทำการส่งพัลส์เข้าไปในสายเคเบิล และตรวจวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับ ถ้าตำแหน่งใดของสายที่อิมพีแดนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลง จะทำให้สัญญาณเกิดการสะท้อนกลับมายัง TDR จากนั้น จึงนำสัญญาณที่สะท้อนกลับ มา ไปประมวลผลและแสดงออกมาให้ทราบได้ ระยะทางจากจุดวัดถึงจุดเสียของสาย สามารถนำมาคำนวณหาระยะทางจากจุดวัดถึงจุดเสีย

$$D = \frac{U \times T_p}{2}$$

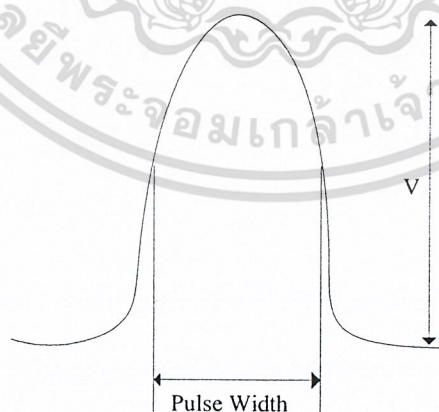
เมื่อ D คือ ระยะทางจากวัดถึงจุดที่เสีย

U คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของสายส่งสัญญาณ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ $u = \frac{u_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}$ m/s โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 180 m/μs ถึง 230 m/μs

T_p คือ เวลาที่สัญญาณใช้ในการเคลื่อนที่ภายในสาย ตั้งแต่ส่งสัญญาณออกไปจนสะท้อนกลับ

2.10.2 สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสาย

สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบส่งเข้าไปในสายส่วนใหญ่จะเป็นสัญญาณ Sine-Squared Pulse ซึ่งมีขนาดแรงดันประมาณ 10-30 V_{peak} และขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ (Pulse Width) อยู่ในช่วง 1ns-2 μs ขึ้นอยู่กับรุ่น ยี่ห้อ และชนิดการใช้งาน เช่น TDR ที่ใช้สำหรับวัดระยะไกลแรงดันที่ต้องใช้สูง Pulse Width ขนาดกว้าง เพื่อให้สัญญาณที่ส่งไปสามารถเคลื่อนที่ไปถึงจุดเสียได้ และสะท้อนกลับมายังเครื่อง



รูปที่ 2.15 รูปสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้าไปในสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง TDR หลายแบบจะมีย่านการเลือกที่กำหนดขนาดของพัลส์ ขั้วขนาดของพัลส์กว้างพลังงานที่ถูกส่งออกไปยิ่งมากขึ้นตามจึงสามารถส่งไปได้ไกล ความกว้างของพัลส์อาจจะเป็น 10ns, 100 ns, 1000 ns, 2000 ns หรือ 4000 ns ตามความเหมาะสมกับการใช้งาน และเครื่อง TDR โดยทั่วไปจะไม่สามารถปรับแรงดันได้ ยกเว้นเครื่องที่ใช้ในการวัดระยะไกล จะสามารถปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมในแต่ละระยะของการวัดได้

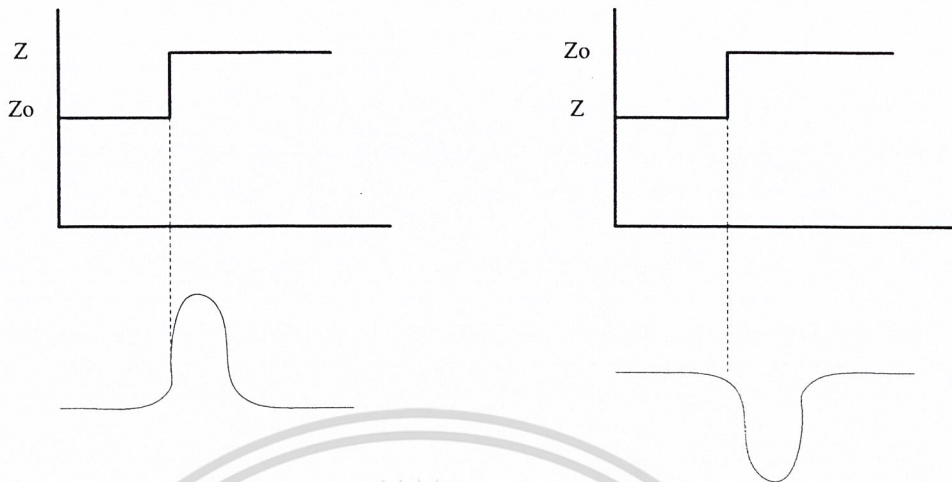
ขนาดความกว้างของสัญญาณที่ส่งไปจะถูกกำหนดไว้อย่างเหมาะสม ในแต่ละระยะของการวัด เนื่องจากสัญญาณแต่ละขนาดให้ผลการวัดที่ดีในระยะต่าง ๆ กัน สัญญาณขนาดแคบ ๆ จะถูกใช้ในการวัดสายระยะสั้น เพื่อให้สามารถแยกสัญญาณที่ส่งไปและสะท้อนกลับได้อย่างชัดเจน ไม่ซ้อนทับกัน TDR ที่มีสัญญาณขนาดแคบมากเท่าไร ก็สามารถวัดระยะจุดเสียได้ไกลขึ้นเท่านั้น แต่ถ้าสัญญาณขนาดความกว้างของพัลส์ต่ำสุดไม่แคบพอ ในบางครั้งจะมีปัญหาในการวัดหาตำแหน่งเสีย เพราะถ้าจุดวัดอยู่ใกล้กับจุดเสียมาก ๆ จะทำให้สัญญาณที่ส่งออกไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับเกิดการซ้อนทับกันทำให้การประมวลผล เกิดความผิดพลาดได้

พัลส์ที่มีขนาดเล็กจะมีพลังงานน้อยกว่าพัลส์ที่มีขนาดใหญ่ สำหรับการวัดสายระยะไกล ต้องใช้พัลส์ที่มีพลังงานมาก ขนาดความกว้างของพัลส์ก็ต้องมากขึ้นตาม เพื่อที่สามารถส่งไปได้ไกลถึงจุดที่อาจเกิดความเสียหายและสามารถที่จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัดได้ ดังนั้นในการวัดระยะจุดเสียของสายเคเบิล เราจึงต้องเลือกขนาดความกว้างของพัลส์ให้เหมาะสมกับความยาวของสายเคเบิล เพื่อที่จะทำให้พัลส์ที่ถูกส่งออกไปมีพลังงานเหลือเพียงพอที่จะสะท้อนกลับมายังเครื่องวัด ถ้าเราใช้พัลส์ที่มีขนาดเล็กส่งไปในสายระยะยาว สัญญาณจะถูกลดทอนภายในสายจนทำให้สัญญาณไม่มีพลังงานเหลือเพียงพอที่จะสะท้อนกลับมาที่เครื่องวัด

เพราะฉะนั้นการเลือกความกว้างของพัลส์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะเราจะต้องเลือกให้เหมาะสม โดยจะต้องคำนึงถึงระยะที่ใช้วัด และค่าการลดทอนภายในสายทั้งสองอย่างควบคู่กันไป ในทางปฏิบัติงานจริง เมื่อต้องการตรวจสอบสายเคเบิลที่ยาวมาก ๆ ให้เริ่มจากการเลือกขนาดของพัลส์ที่มีขนาดกว้างเล็กที่สุด และเพิ่มความกว้างไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพบตำแหน่งที่ชำรุด

2.10.3 รูปร่างและสัญญาณสะท้อนกลับ

สัญญาณที่สะท้อนกลับมานั้นจะสะท้อนกลับมาได้ตรงตำแหน่งที่อิมพีแดนซ์ มีการเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้น หรือ ลดลง สิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดการสะท้อนที่แตกต่างกัน



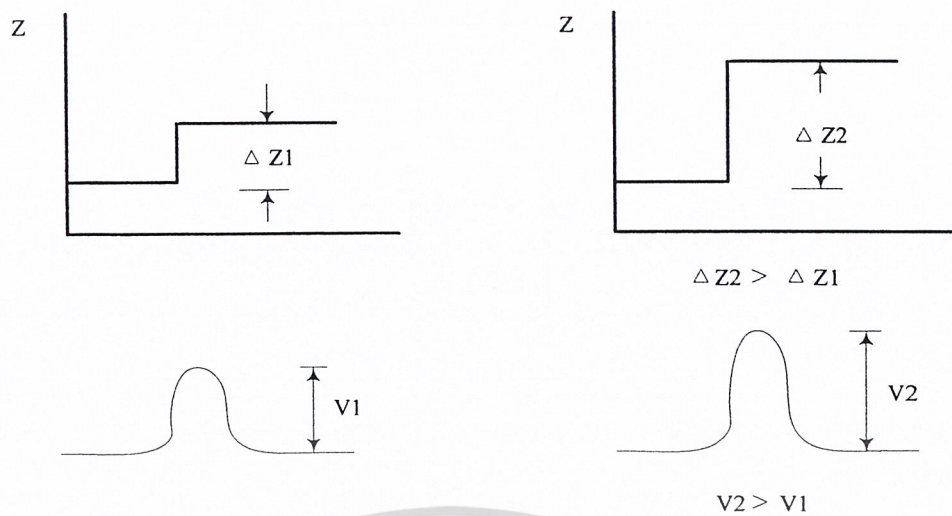
ก) พัลส์สะท้อนกลับแบบบวก

ข) พัลส์สะท้อนกลับแบบลบ

รูปที่ 2.16 รูปร่างของสัญญาณสะท้อนกลับ

จะเห็นว่ากรณีที่อิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เพิ่มขึ้น สัญญาณที่สะท้อนกลับมามีลักษณะเดียวกันกับสัญญาณที่ส่งไปหรือที่เรียกว่า พัลส์สะท้อนกลับแบบบวก (Positive Return Pulse) แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลงสัญญาณที่สะท้อนกลับมามีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับสัญญาณที่ส่งไป หรือที่เรียกว่า พัลส์สะท้อนกลับแบบลบ (Negative Return Pulse) จากเหตุผลที่แตกต่างดังกล่าว ทำให้เราสามารถที่จะวิเคราะห์ลักษณะของเหตุเสียที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากเหตุเสียแต่ละชนิดทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่แตกต่างกัน เหตุเสียที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นคือเหตุเสียแบบ Series Fault อันได้แก่ สายขาด, หลวม หรือเกิดออกไซด์ที่จุดต่อ และเหตุเสียที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงคือเหตุเสียแบบ Shunt Fault อันได้แก่ สายลัดวงจร, สายแตะดิน เป็นต้น

อิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปนอกจากจะมีผลต่อลักษณะของสัญญาณที่สะท้อนกลับแล้วยังมีผลต่อขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับอีกด้วย ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับ

จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณสะท้อนกลับจะมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยเพียงใด ถ้าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไปมากก็จะทำให้ขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามาก แต่ถ้าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับก็น้อยลงไปด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับจะแสดงให้เห็นว่าสัญญาณนั้นสามารถสะท้อนกลับได้ดีเพียงใด ในทางปฏิบัติจะเห็นว่ากรณีที่เหตุเสียเกิดขึ้นไม่รุนแรง สัญญาณจะสะท้อนกลับมาเพียงเล็กน้อย จะทำให้ยากต่อการวัดหาตำแหน่งเสีย เนื่องจากอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

โดยทั่วไปการสะท้อนกลับของสัญญาณจะมากหรือน้อยจะถูกกำหนดในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) ซึ่งจะบ่งบอกถึงความสามารถในการสะท้อนกลับของสัญญาณ ที่จุดนั้น ๆ โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่สะท้อนกลับมากับสัญญาณที่ส่งไป ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น ๆ

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

บล็อกไดอะแกรมของระบบ

บล็อกไดอะแกรมรวมของระบบประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) วงจรแปลงแรงดัน (Regulate) แบ่งเป็น 2 วงจร
 - 1.1) วงจรแปลงแรงดัน 5 V
 - 1.2) วงจรแปลงแรงดัน 12+V, -12 V, ground
- 2) วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator)
- 3) วงจรเลือกสัญญาณ (Selector)
- 4) วงจรขับสัญญาณ (Line Driver)
- 5) วงจรตรวจจับสัญญาณ (Pulse Detector)
- 6) วงจรรวมสัญญาณ (Summing Circuit)
- 7) วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ (Time & Status Detector)
- 8) วงจรคูณสัญญาณ (Multiplier)
- 9) วงจรนับ (Counter)
- 10) วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter)
- 11) ภาษาVHDL (VHSIC hardware Description Language (VHSIC : Very High Speed Integrated Circuit)
- 12) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro Controller Unit)
- 13) จอแสดงผล (Liquid Crystal Display Module)

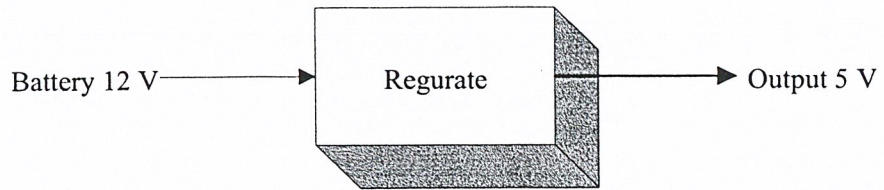
3.1 วงจรแปลงแรงดัน

3.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5 V (ICL7805)

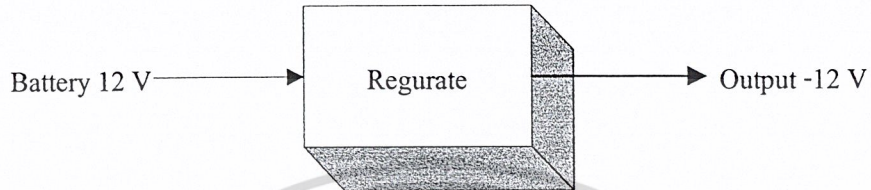
ในส่วนของวงจรแปลงแรงดันนี้ จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่ 12 V ให้ลดลงเหลือเพียง 5 V โดยใช้ ICL7805

3.1.2 วงจรแปลงแรงดัน +12 V, +12 V, ground (ICL76605S)

ในส่วนของวงจรถแปลงแรงดันนี้ จะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่ 12 V ให้เป็นไฟลบ โดยใช้ ICL76605S



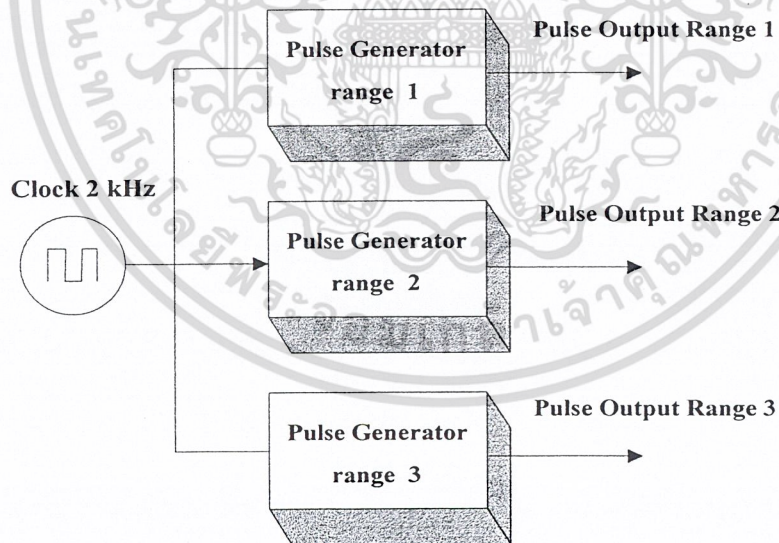
รูปที่ 3.1(ก)



รูปที่ 3.1(ข)

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงแรงดัน

3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (#74HC123)



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

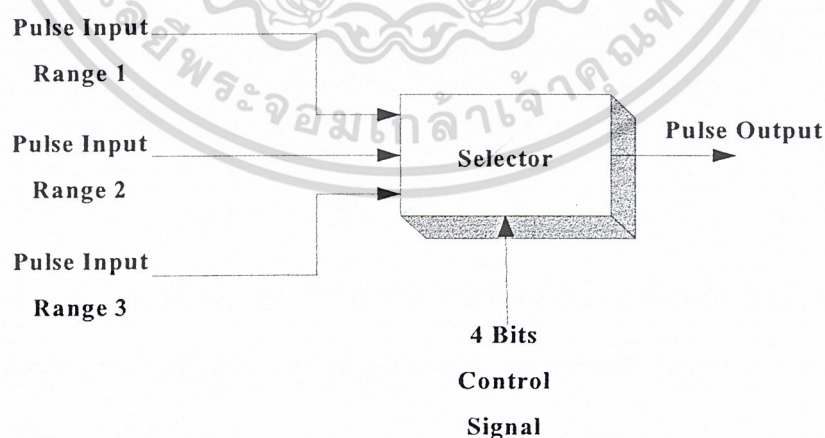
ในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ จะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณพัลส์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ย่านตามความเหมาะสมดังนี้ $0.2 \mu\text{sec}$, $0.8 \mu\text{sec}$, $3 \mu\text{sec}$ เหตุผลที่เลือกใช้ย่านความกว้างของพัลส์ดังนี้เพราะว่าขีดเอาค่าของบริษัทผู้ผลิต TDR เป็นหลักเนื่องจากมีความเชื่อถือได้สูง และเหตุผลที่จะต้องทำการแบ่งออกเป็นย่านดังกล่าวเพื่อให้เหมาะสมกับระยะทางหรือความยาวของสายส่งที่จะทำการทดสอบเพื่อให้ง่ายต่อการนำมาประมวลผลในขั้นตอนต่อไป โดยมีการใช้สัญญาณอินพุต เป็นพัลส์ปกติที่ผลิตความถี่ที่ 2 kHz เป็นตัวควบคุมจังหวะการกำเนิดสัญญาณเอาต์พุต

ซึ่งความกว้างของพัลส์นี้จะมีผลต่อการวัดระยะทางรวมถึงขีดความสามารถในการวัด นั่นคือระยะทางที่ใกล้ที่สุดและไกลที่สุดที่จะทำการวัดขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ ถ้าต้องการให้เครื่องมือสามารถวัดได้ในระยะทางใกล้ ๆ ความกว้างของพัลส์จะต้องมีความแคบมาก ๆ ถ้าความกว้างของพัลส์ไม่เหมาะสมกับระยะทางของสายส่งที่จะทำการทดสอบแล้วจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างคลื่นที่ทำการส่งไป (Traveling Wave) กับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากสายส่ง (Reflected wave) ถ้าเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นเราจะไม่สามารถนำสัญญาณไปวิเคราะห์หรือนำไปประมวลผลได้

ซึ่งในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์นี้ จะใช้ IC #74LS123 โดยจะสามารถผลิตเอาต์พุตเป็นลักษณะ Monostable Multivibrator โดยอาศัยสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 kHz ป้อนเข้าวงจรเป็น สัญญาณนาฬิกาควบคุมจังหวะการกำเนิดสัญญาณเอาต์พุตได้ตามที่เราต้องการ ในส่วนของวงจรที่จะออกแบบจะกล่าวถึงในบทต่อไป

ในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา 2 kHz ที่เป็นตัวกำหนดจังหวะการเกิดสัญญาณเอาต์พุตนั้น เราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้าง

3.3 วงจรเลือกสัญญาณ

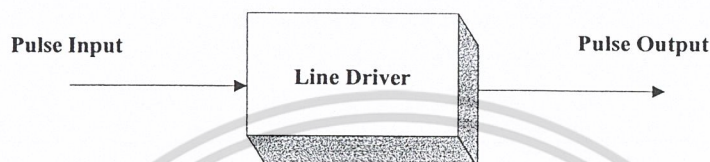


รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเลือกสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของวงจรเลือกสัญญาณ นั้น เราจะใช้ทำหน้าที่ควบคุมการปล่อยพัลส์ไปสู่ส่วนของวงจรจับสัญญาณแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในส่วนของวงจรมีจะรับสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ เข้ามาทั้ง 4 สัญญาณ แต่จะส่งสัญญาณพัลส์ออกไปเพียงอันเดียว โดยกำหนดสัญญาณเอาต์พุตได้จากสัญญาณ ควบคุมที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในส่วนนี้ของวงจรเลือกสัญญาณนี้ เราได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

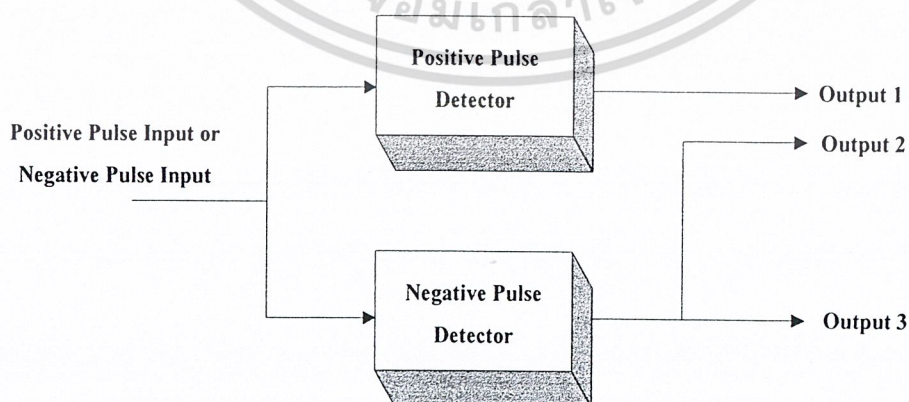
3.4 วงจรจับสัญญาณ (#LM6365, #LH0002)



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรจับสัญญาณ

วงจรจับสัญญาณจะทำหน้าที่ในการจับสัญญาณพัลส์ที่ถูกสร้างจากส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ผ่านวงจรเลือกสัญญาณเพื่อเพิ่มกำลังส่งให้กับพัลส์ขาส่ง ที่จะทำการส่งเข้าไปในสายส่งที่จะทำการทดสอบ เนื่องจากในส่วนของวงจรกำเนิดพัลส์นั้นมีกำลังส่งต่ำเกินไป เพราะถ้าส่งโดยไม่ผ่านวงจรจับสัญญาณ จะทำให้สัญญาณที่ส่งไปส่งไปได้ไม่ไกลและไม่สะท้อนกลับมา และยังต้องการให้ระดับพัลส์ที่จะสะท้อนกลับมา มีระดับสูงขึ้นเพื่อที่จะได้ง่ายต่อการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งในส่วนนี้เราได้ใช้ IC #LM6365 เป็นตัวขยายสัญญาณ และใช้ LH0002 เป็นตัวจับสัญญาณ เนื่องจากสามารถให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ

3.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ (#LM710)



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

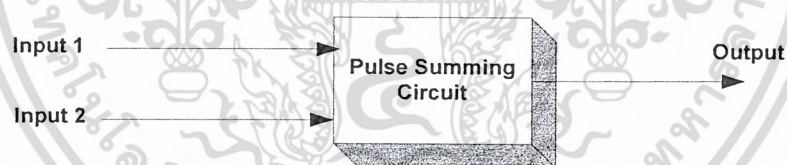
วงจรตรวจจับสัญญาณ ส่วนนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณพัลส์ทั้งขาส่ง และสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา ซึ่งสัญญาณต่าง ๆ ที่ออกจากวงจรจับสัญญาณรวมถึงสัญญาณสะท้อนกลับจะถูกตรวจจับจากส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวตรวจจับพัลส์บวก (Positive Pulse Detector) และตัวตรวจจับพัลส์ลบ (Negative Pulse Detector) และเมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาในวงจรต่ำหรือสูงกว่าแรงดันเปรียบเทียบ (Voltage Reference) ที่ตั้งไว้วงจรตรวจจับนี้จะให้เอาต์พุตออกมา ซึ่งเอาต์พุต 1 และเอาต์พุต 2 จะถูกส่งไปวงจรรวมสัญญาณต่อไป ส่วนเอาต์พุต 3 จะถูกส่งไปวงจร T – Flip Flop 2 เพื่อทำการแยกลักษณะของการชำระชุดของสาย

ลักษณะการตรวจจับจะใช้ OP – AMP ที่ต่อเป็นวงจร Comparator โดยจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณบวกและสัญญาณลบ ดังนั้นในภาคนี้จะต้องมีการปรับแต่งระดับของแรงดันเปรียบเทียบเพื่อใช้เป็นแรงดันอ้างอิงในการตรวจจับสัญญาณคลื่นที่เป็นทั้งคลื่นบวกและคลื่นลบให้ได้

เนื่องจากว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมามีระดับของแอมพลิจูดที่ต่ำมาก แต่เราจะไม่ทำการปรับแรงดันเปรียบเทียบให้อยู่ที่ระดับศูนย์ เพราะว่าถ้าทำเช่นนั้นแล้วจะทำให้ระดับของสัญญาณรบกวน (Noise Signal) ถูกตรวจจับไปด้วย ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดความผิดพลาดเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะทำให้เราไม่สามารถตรวจหาสัญญาณที่แท้จริงได้ เราจึงต้องมีการออกแบบและปรับแต่งให้แรงดันเปรียบเทียบ อยู่ในระดับที่เหมาะสมที่สุด

ในส่วนวงจรนี้ เราใช้ IC #LM710 ซึ่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณ

3.6 วงจรรวมสัญญาณ

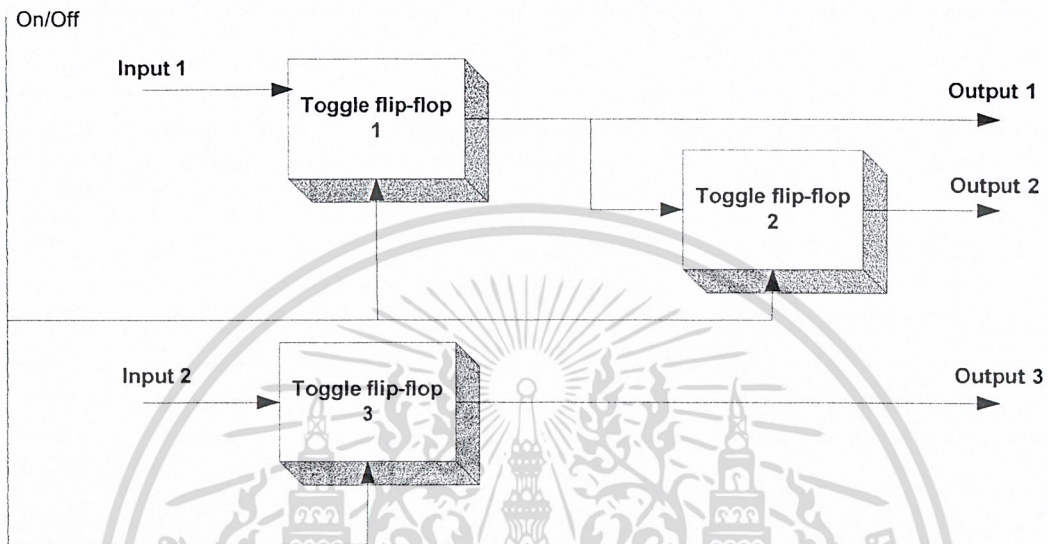


รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวมสัญญาณ

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณ 2 สัญญาณที่ส่งมาจากภาคตรวจจับสัญญาณ เพื่อนำสัญญาณเหล่านี้มาทำการรวมกันทางแกนเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าในส่วนของภาคนี้จะรับอินพุตมาจากในส่วนของวงจรตรวจจับพัลส์ลบจะไม่ทำงาน จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจรรวมสัญญาณมีเป็นพัลส์บวกค่าหนึ่งตามลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับพัลส์บวก และเมื่อพัลส์นั้นสะท้อนกลับมา ซึ่งอาจจะเป็นได้ว่าเป็นพัลส์บวกหรือพัลส์ลบก็ตาม จะทำให้เอาต์พุตที่วงจรรวมสัญญาณมีค่าออกมาเป็นพัลส์บวกอีกเช่นเดียวกัน ตามลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับสัญญาณพัลส์บวกหรือลบ ซึ่งจะทำให้เอาต์พุตของวงจรนี้เป็นสัญญาณที่เรียงกันและมีระยะห่างเกิดขึ้น ซึ่งระยะห่างของ

พัลส์ที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นสัดส่วนกับความยาวของสายที่ทำการทดสอบ ซึ่งในส่วนของวงจรรวมสัญญาณนี้ เราได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

3.7 วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ

ในภาคนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ T – Flip Flop 1 หรือส่วนของวงจรตรวจจับเวลา ซึ่งจะมีหน้าที่คือแปลงระยะห่างระหว่างพัลส์ 2 ลูก ซึ่งได้รับสัญญาณมาจากในส่วนของวงจรรวมสัญญาณ คือ พัลส์ขาส่งกับพัลส์สะท้อนกลับให้เป็นพัลส์ลูกเดียวที่มีความกว้างของพัลส์เท่ากับระยะห่างระหว่างพัลส์ 2 ลูกนี้ เพราะ T – Flip Flop จะเปลี่ยนสถานะเมื่อมีพัลส์บวกเข้ามา ซึ่งก็คือเมื่อเอาต์พุตจากวงจรรวมสัญญาณลูกแรกเข้ามา T – Flip Flop จะเปลี่ยนสถานะจาก “0” เป็น “1” ไปจนกระทั่งมีเอาต์พุตจากวงจรรวมสัญญาณอีกตัวหนึ่งมาจะทำให้ T – Flip Flop จะเปลี่ยนสถานะจาก “1” เป็น “0” จะทำให้ได้เอาต์พุตจากวงจร T – Flip Flop เป็นลักษณะสัญญาณพัลส์ลูกเดียว ซึ่งความกว้างของพัลส์นั้น ก็คือระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนไปและกลับ ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะส่งไปยังวงจรคูณสัญญาณ เพื่อจะนำไปประมวลผลต่อไป และยังเป็นสัญญาณที่ส่งไปยังวงจรกำเนิดสัญญาณ เพื่อเป็นตัวกำหนดการเริ่มและหยุดนับของวงจรรับ และก็จะส่งไปไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวกำหนดการเริ่มรับค่าและเคลียร์ข้อมูล

T – Flip Flop 2 จะมีหน้าที่คือตรวจสอบสถานะของสายว่าชำรุดหรือไม่โดยการรับค่ามาจากส่วนของ T – Flip Flop 1 เพราะถ้า T – Flip Flop 1 ทำงานแสดงว่า สายมีการชำรุดแต่ถ้า T – Flip Flop 1 ไม่ทำงานหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาส่ง แสดงว่าสายนั้นไม่ชำรุด ซึ่งเราได้ใช้ขอบข่ายของสัญญาณจากวงจร T – Flip Flop 1 เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนสถานะของ T – Flip Flop 2 ซึ่งถ้า T –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flip Flop 2 เป็น “1” แสดงว่าสายชำรุด แต่ถ้า T – Flip Flop 2 เป็น “0” แสดงว่า สายไม่ชำรุด และส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลต่อไป ซึ่งแสดงสถานะได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการตรวจับการเสียของสายจากในส่วนวงจรตรวจสอบสายดีหรือเสีย

เหตุการณ์	Output T – Flip Flop	Logic
สายชำรุด	พัลส์ 5 V	“1”
สายไม่ชำรุด	พัลส์ 0 V	“0”

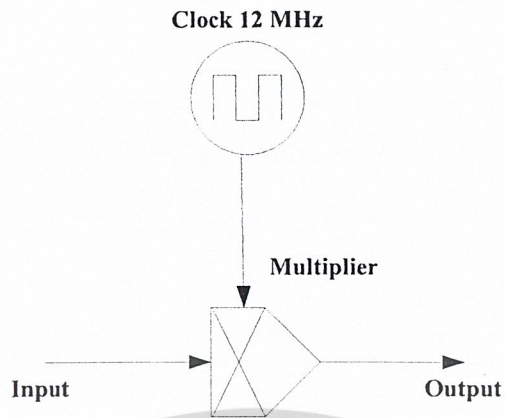
ส่วน T – Flip Flop 3 จะมีหน้าที่คือตรวจสอบสถานะของสายว่าเป็นการชำรุดแบบไหน เพื่อส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงผลต่อไป ซึ่งจะสามารถตรวจสอบได้โดยเมื่อส่งสัญญาณพัลส์เข้าไปในสาย วงจรตรวจับสัญญาณลบจะไม่ทำงานคือจะให้เอาต์พุต สถานะเป็น “0” ซึ่งจะทำให้ T – Flip Flop คงค่าสถานะเดิมไว้คือ “0” และเมื่อพัลส์ที่สะท้อนกลับมามีค่าเป็นบวก ทำให้ในส่วนของวงจรตรวจับพัลส์ลบไม่ทำงานทำให้ T – Flip Flop คงค่าสถานะเดิมไว้คือ “0” เช่นเดิม แต่ถ้าพัลส์ที่สะท้อนกลับมาเป็นพัลส์ลบ จะทำให้วงจรตรวจับพัลส์ลบทำงานทำให้ T – Flip Flop เปลี่ยนสถานะ “1” ซึ่งจะทำให้เราสามารถทราบได้ว่าสายมีการชำรุดแบบไหนได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการตรวจับชนิดการเสียของสายจากในส่วนวงจรตรวจสอบสายเปิดหรือลัดวงจร

เหตุการณ์	Output T – Flip Flop 2	Logic
ลัดวงจร	พัลส์ 5 V	“1”
วงจรขาด	พัลส์ 0 V	“0”

ในส่วนของวงจร T – Flip Flop นี้เราได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

3.8 วงจรคูณสัญญาณ

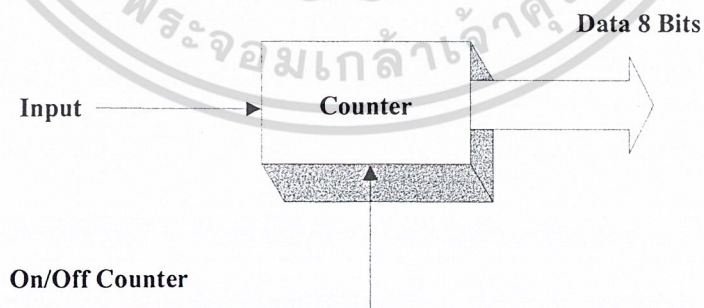


รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมคูณสัญญาณ

ในส่วนนี้อินพุตของระบบคือสัญญาณพัลส์ที่รับเข้ามาจาก T-Flip Flop 1 ซึ่งเป็นพัลส์ที่มีความกว้างเท่ากับเวลาที่แตกต่างกันของพัลส์ขาส่ง และพัลส์ที่สะท้อนกลับ สัญญาณพัลส์สัญญาณนี้จะผ่านเข้ามายังวงจรมคูณสัญญาณ โดยมีสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Square Pulse) ความถี่ 12 MHz เป็นตัวคูณกับสัญญาณพัลส์ที่รับเข้ามา ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของ T-Flip Flop 1 เมื่อผ่านระบบนี้แล้ว ความกว้างของพัลส์จะถูกระบบนี้แบ่งความกว้างของพัลส์ออกเป็น พัลส์ตึกเล็ก ๆ จำนวนหนึ่งและสัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้จะนำไปประมวลผลยังภาคต่อไป

ซึ่งในส่วนของวงจรมคูณสัญญาณนี้ เราได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

3.9 วงจรนับ (#74HC393)



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมนับ

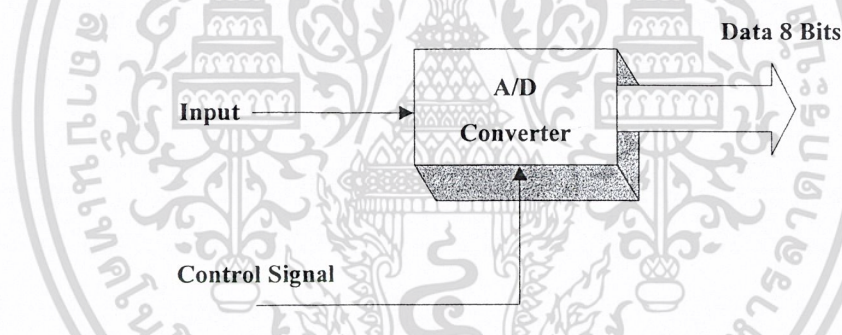
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในส่วนนี้จะทำหน้าที่นับสัญญาณอินพุต ซึ่งในที่นี้จะเป็นสัญญาณที่ได้จากการคูณระหว่างสัญญาณที่ได้จาก T-Flip Flop 1 กับสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 MHz โดยที่ วงจรภาคนับจะทำการนับทุก ๆ ช่วงการคูณสัญญาณ นั่นคือวงจรมับจะนับเฉพาะช่วงที่เกิดระยะห่างของพัลส์ขาส่งและพัลส์สะท้อนกลับเท่านั้น ช่วงอื่น ๆ จะเป็นลอจิก “0” และจะทำการนับใหม่ เมื่อทำการส่งสัญญาณพัลส์ขาส่งออกไปและสิ้นสุดการนับเมื่อมีพัลส์สะท้อนกลับมา ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวงจรจะทำการเริ่มนับใหม่ทุก ๆ 0.5 ms

ส่วนสัญญาณ On/Off Counter นั้นเราใช้สัญญาณจากวงจร เพื่อเป็นตัวบอกให้เริ่มนับและหยุดนับ เพราะถ้าเราทำการป้อนสัญญาณที่ได้จากการคูณเข้าไปนับโดยตรงจะเกิดปัญหาคือ การนับจะไม่เป็นระเบียบและไม่สามารถหาค่าเอาต์พุตที่จะนำไปประมวลผลได้ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีสัญญาณหนึ่งเป็นตัวบอกให้วงจรเริ่มนับและหยุดนับ ดังนั้นสัญญาณที่จะนำมาทำงานนี้ได้จะต้องมีความสัมพันธ์กับระยะห่างของพัลส์ขาส่งและพัลส์สะท้อนกลับด้วย เพื่อให้การนับมีความถูกต้องแม่นยำและมีความผิดพลาดให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ซึ่งในส่วนของวงจรนี้เราได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

3.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (#ADC 0820)



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล

การทำงานในส่วนนี้จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่สะท้อนกลับมาให้เป็นข้อมูลแบบดิจิตอลขนาด 8 บิต เพื่อที่จะส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลต่อไป โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นสัญญาณที่ส่งเข้าไปในสายและมีสัญญาณที่สะท้อนกลับมา โดยสัญญาณควบคุมก็คือสัญญาณจาก T-Flip Flop 1 ซึ่งนำมาควบคุมจังหวะการเขียนหรืออ่านข้อมูลนั่นเอง ซึ่งจะใช้ขอบขาสูงเป็นตัวควบคุมจังหวะการอ่านของ A/D

ในส่วนนี้เราได้นำ IC #ADC 0820 มาใช้ ซึ่งจะให้เอาต์พุตขนาด 8 บิตออกมา โดย IC ตัวนี้จะสามารถแปลงสัญญาณได้ทั้งบวกและลบ และมีความไวในการแปลงข้อมูลค่อนข้างสูง

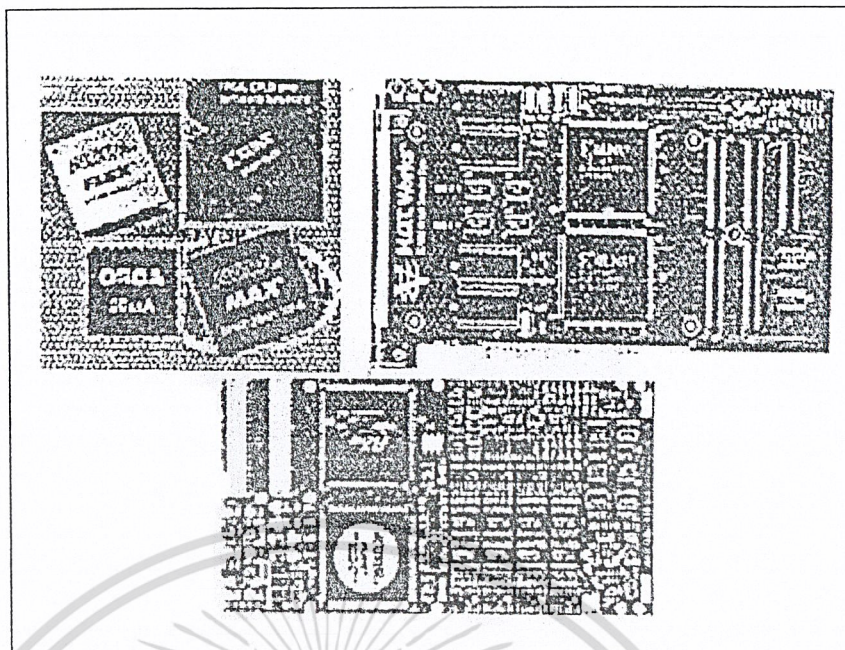
3.11 การออกแบบและสร้างวงจรในส่วนที่เป็นดิจิทัลด้วยภาษา VHDL

การออกแบบวงจรเชิงเลข (Digital Circuit) นั้น ในปัจจุบันก้าวหน้าไปอย่างมาก โดยการใช้ออกแบบบรรยายการทำงานของวงจร (Hardware Description Language : HDL) ซึ่งเป็นภาษาที่ใช้สำหรับออกแบบฮาร์ดแวร์ โดยภาษาที่เป็นมาตรฐานสากล เช่น Verilog หรือ VHDL (VHSIC hardware Description Language (VHSIC: Very High Speed Integrated Circuit)) หรือภาษาที่ไม่เป็นมาตรฐานเช่น AHDL (Altera Hardware Description Language) หรือ PHDL (Philips Hardware Description Language) เป็นต้น มาบรรยายการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้ ได้ใช้ภาษา VHDL มาทำการออกแบบวงจรในส่วนที่เป็นดิจิทัล ทำให้ลดความยุ่งยากในการนำเอาอุปกรณ์มาเชื่อมต่อให้เป็นวงจร รวมทั้งลดเวลาที่ใช้ในการออกแบบและทดสอบการทำงาน ซึ่งมีความแตกต่างเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบในอดีตที่ผ่านมา คือผู้ออกแบบจะนำเอาอุปกรณ์แต่ละตัวที่ทำการออกแบบไว้มาทำการต่อทดลองในแผงวงจรจริง และทำการทดสอบวงจรเพื่อหาข้อผิดพลาด ซึ่งต้องใช้เวลานานกับการแก้ปัญหาแต่ละอย่างที่เกิดขึ้น แต่ในการออกแบบด้วยภาษา VHDL ผู้ออกแบบเพียงแต่เขียนซอสโค้ด (Source Code) บรรยายการทำงานของวงจร หลังจากนั้นก็ทำการคอมไพล์ (Compile) แล้วจำลองการทำงาน (Simulate) ว่าจะได้ฟังก์ชันการทำงานและ ไทม์มิ่ง (Timing) ตามที่ต้องการหรือไม่ จากนั้นก็นำซอสโค้ดที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ด้วยโปรแกรมสังเคราะห์ (Synthesis Tool) สุดท้ายนำวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำการแมป (Map) ลงไปยัง FPGA (Field Programmable Gate Array) เพื่อเป็นชิป (Chip) ต้นแบบสำหรับการนำไปทดสอบการทำงาน

3.11.1 การออกแบบวงจรเชิงเลขด้วยอุปกรณ์ FPGA

อุปกรณ์ FPGA (Field Programmable Gate Array) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการโปรแกรมวงจรที่ได้ออกแบบลงไปเพื่อให้อุปกรณ์ FPGA มีฟังก์ชันการทำงานตามที่ออกแบบไว้ ในการทำ FPGA ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบ IC (Integrated Circuit) แบบ Semicustom อีกวิธีหนึ่ง เมื่อเทียบกับการทำ ASICs (Application Specific Integrated Circuits) แล้วนั้นก็ยังมีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ การทำ FPGA จะมีข้อจำกัดในด้านขนาดของวงจรเพราะภายในอุปกรณ์ FPGA จะมีจำนวนเกต (gate) ให้ใช้จำนวนจำกัด และการทำ FPGA ก็เหมาะสำหรับการทำผลิตภัณฑ์ต้นแบบหรือเพื่อผลิตในปริมาณต่ำ ส่วนข้อดีของการทำ FPGA ก็คือระยะเวลาที่ใช้ในการทำตั้งแต่เขียนรหัส (code) อธิบายฮาร์ดแวร์จนกระทั่งดาวน์โหลด (download) นั้นน้อยกว่าการทำ ASIC มากและการตรวจสอบหรือแก้ไขการออกแบบก็ทำได้สะดวก

การทำ FPGA ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพและความสะดวกมากขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากทางบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ FPGA ได้เพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ FPGA โดยเพิ่มจำนวนองค์ประกอบภายในหรือ ปรับปรุงโครงสร้างสถาปัตยกรรมภายใน และยังได้เพิ่มประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำ PPR (Partitioning Placement and Routing) สำหรับอุปกรณ์นั้น ๆ ด้วย ลักษณะของตัว FPGA และการนำไปใช้งานแสดงดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะของตัว FPGA และการนำไปใช้งาน

สำหรับตัวอุปกรณ์ FPGA นั้นก็มีโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีที่ใช้สร้าง ตลอดจนเทคนิควิธีการ โปรแกรมที่แตกต่างกันสำหรับผู้ผลิตแต่ละราย นอกจากนั้นอุปกรณ์ FPGA ของแต่ละผู้ผลิตก็มีโครงสร้างและความสามารถที่แตกต่างกันบางส่วน ในการใช้งานนั้นอุปกรณ์ FPGA สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เช่น การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (DSP : Digital Signal Processing) การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

3.11.2 การออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายการทำงานของฮาร์ดแวร์

ในการออกแบบวงจรเชิงเลขนั้นทำได้โดยการวาดวงจร หรือใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ไม่แตกต่างกันระหว่างการออกแบบด้วย FPGA และ ASIC ในกรณีที่ใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ แต่ในกรณีที่ออกแบบโดยวิธีการวาดวงจรจะไม่แตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าการออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ทำได้สะดวกกว่า เพราะการทำด้วยวิธีนี้ไม่ต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ (Technology Independence) และที่สำคัญการออกแบบด้วยวิธีนี้สามารถที่จะแก้ไขโมเดล (Model) หรือเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีได้สะดวกกว่าเพราะไม่ต้องวาดวงจรใหม่ นั่นคือการออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์จะทำให้โมเดลที่ได้ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยี

ในการเขียนโค้ด สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือเขียนอย่างไรจึงจะสามารถสังเคราะห์เป็นวงจรได้ และให้คุณสมบัติของวงจรตามที่กำหนด เพราะลักษณะการเขียนโค้ดจะมีผลโดยตรงกับวงจรที่ได้ เนื่องจากในการสังเคราะห์วงจรนั้นซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจร (Synthesis Tools) จะทำการสังเคราะห์ตามโค้ดที่เขียน ถ้าอธิบายการทำงานของวงจรเดียวกัน แต่เขียนโค้ดในลักษณะที่ต่างกันเมื่อสังเคราะห์แล้วจะได้วงจรที่ต่างกัน และจากวงจรที่ต่างกัน เมื่อนำไปทำต้นแบบด้วย FPGA หรือการทำ ASIC แล้วจะได้ไอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีคุณสมบัติต่างกันทั้งในด้านของขนาดหรือความเร็ว (area and time) ส่วนการเขียนโค้ดลักษณะใด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดนั้นก็ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการออกแบบ

3.11.3 การจำลองการทำงานของวงจร (Simulation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะเป็นขั้นตอนที่ใช้ตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของวงจรว่าถูกต้องหรือไม่มีข้อผิดพลาดตรงไหน เพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขให้ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองการทำงานของวงจร เช่น V-System และ ModelSim ของบริษัท Model Technology

3.11.4 การสังเคราะห์วงจร (Synthesis)

ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจร ทำการสังเคราะห์โค้ดเพื่อให้ได้เป็นวงจรขึ้นมา แต่ต้องตรวจสอบด้วยว่าซอฟต์แวร์นั้น ๆ สนับสนุนเทคโนโลยี FPGA (FPGA Library) ที่ต้องการใช้หรือไม่ โดย FPGA ที่นิยมใช้งานเช่นของบริษัท Xilinx ตระกูล XC4000 และบริษัท Altera ตระกูล FLEX 10 K ซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรที่นิยมใช้เช่น โปรแกรม Leonardo Spectrum ของบริษัท Exemplar Logic ซึ่งในขั้นตอนนี้ซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรจะแปลงโค้ดและทำการออปติไมซ์ (Optimization) เพื่อให้ได้วงจรตามเทคโนโลยีที่เลือกใช้ นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดข้อบังคับสำหรับวงจรได้เช่น ข้อบังคับในเรื่องเวลา (time constraints) หรือข้อบังคับในเรื่องของพื้นที่ ซึ่งข้อบังคับเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนออปติไมซ์เพื่อให้วงจรที่ได้เป็นไปตามที่กำหนด ส่วนสำคัญในการออปติไมซ์คือการเทียบ (mapping) วงจรให้เข้ากับเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อให้ได้วงจรที่เหมาะสมกับโครงสร้างสถาปัตยกรรมภายในอุปกรณ์ FPGA ในกรณีของ Xilinx ตระกูล XC4000 และ Altera ตระกูล FLEX 10 K จะเทียบโดยใช้วิธี LUT (Look Up Table) เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จแล้วซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรก็จะมีรายงานผลว่าวงจรที่ออกแบบไปนั้นเป็นอย่างไร เช่น มีความหน่วง (delay) เท่าไร ใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ใน FPGA อะไรบ้าง เป็นต้น

3.11.5 การแบ่งวงจร (Partitioning)

ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์ให้เป็นส่วนย่อย ๆ สำหรับลงใน CLBs, IOBs หรือ องค์ประกอบอื่น ๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งคือให้แต่ละส่วนที่จะแยกออกจากกันมีจำนวนสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างกันน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อช่วยลดความหนาแน่นในตอนทำการเชื่อมต่อสัญญาณ (routing) ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ทำ โดยซอฟต์แวร์จะเทียบส่วนประกอบของวงจรเช่น เกท (gate) , ฟลิปฟลอป (flipflop) ลงในทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในอุปกรณ์ FPGA (CLBs, IOBs, BUFT และ edge decoder) หลังจากทำขั้นตอนนี้เสร็จแล้วสามารถที่จะทราบว่าวงจรใช้จำนวนทรัพยากรภายในอุปกรณ์ FPGA ไปเท่าไร ส่วนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับตัว FPGA ที่ใช้งาน เช่น FPGA ของบริษัท Xilinx จะใช้ Xilinx Foundation Series 2.1i ซึ่งซอฟต์แวร์ตัว

นี้จะรวมเอาซอฟต์แวร์ย่อยอื่น ๆ อีก เพื่อให้การทำ PPR (Partitioning, Placement and Routing) เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ส่วน FPGA ของบริษัท Altera จะใช้ Altera MAX + II

3.11.6 การวางอุปกรณ์ (Placement)

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกทำเลที่ตั้งของแต่ละส่วนของวงจรที่ผ่านการแบ่งวงจร (partitioning) มาแล้วว่า ควรจะอยู่ในตำแหน่งใดในอุปกรณ์ FPGA เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เช่นวงจรส่วนไหนควรอยู่ใกล้กันเพื่อจะได้ค้นหาเส้นทาง (route) ได้ง่ายหรือช่วยลดความหน่วง จะเห็นได้ว่าตำแหน่งภายในอุปกรณ์ FPGA นั้นมีความสำคัญ เพราะถ้าจัดวางวงจรลงในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ความหน่วงเพิ่มขึ้น หรือตัว Router ทำการค้นหาเส้นทางสัญญาณได้ไม่หมด

3.11.7 การเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA เช่นระหว่าง CLBs หรือระหว่าง CLBs กับ IOBs ขั้นตอนนี้จะทำต่อเนื่องจากการวางอุปกรณ์ ในกรณีที่ทำการวางอุปกรณ์ไว้ไม่ดีซอฟต์แวร์ ก็จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณได้ไม่หมดหรือเกิดความหน่วงเกินค่าที่กำหนดในข้อบังคับ โดยสามารถทำขั้นตอนนี้ได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ เช่นกัน หรือจะทำการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยตัวเอง (manual layout) ก็ได้ แต่ทางที่ดีควรใช้ซอฟต์แวร์ทำดีกว่าโดยให้ทำการค้นหาเส้นทางหลาย ๆ ครั้งเพื่อหาครั้งที่ดีที่สุด นอกจากนั้นการกำหนดข้อบังคับกับเวลา (time constraints) จะช่วยให้ผลที่ได้จากการทำการเชื่อมต่อสัญญาณดีขึ้นได้

3.11.8 การโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA (Configuration)

หลังจากที่วงจรผ่านขั้นตอนต่าง ๆ จนกระทั่งผ่านการทำ PPR (Partitioning Placement and Routing) แล้วนั้น ถึงตอนนี้ก็สามารถที่จะดาวน์โหลด (download) ในอุปกรณ์ FPGA ได้แล้ว ในการดาวน์โหลดนี้ก่อนอื่นต้องแปลงแบบวงจรรวมที่ได้ให้เป็นข้อมูลวงจร (Configuration data) ซึ่งอยู่ในรูปของบิตสตรีม (Bit-stream) ก่อนแล้วจึงดาวน์โหลดไปเพื่อให้อุปกรณ์ FPGA มีฟังก์ชันการทำงานตามวงจรที่ออกแบบไว้

จากที่อธิบายมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการออกแบบเพื่อทำ FPGA นั้น ทำได้สะดวกกว่าการทำ ASIC มากเพราะใช้เวลาน้อยกว่ามาก ส่วนสำคัญที่ใช้ในการทำ FPGA คือซอฟต์แวร์ที่ใช้ตั้งแต่การเขียนโค้ด อธิบายฮาร์ดแวร์จนกระทั่งดาวน์โหลดลงในอุปกรณ์ FPGA ซึ่งซอฟต์แวร์ที่ใช้ต้องเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำงานต่อเนื่องกัน

3.12 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งซึ่งรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรจับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้นภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม

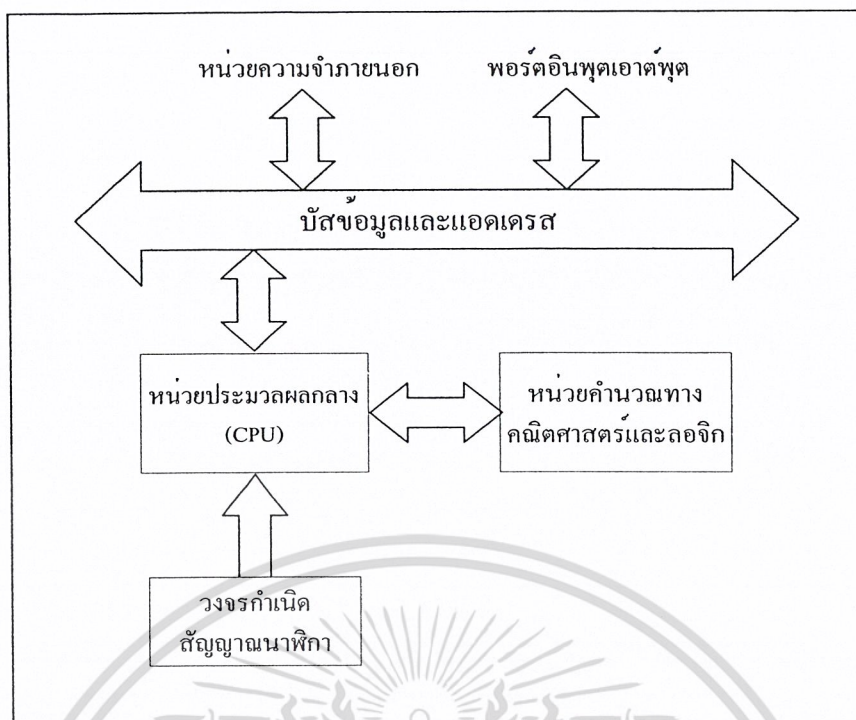
ไมโครคอนโทรลเลอร์มาจากคำ 2 คำรวมกันคือ “ไมโคร” (micro) ซึ่งหมายถึงไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลขนาดเล็กภายในประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit) หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU : Arithmetic Logic Unit) วงจรเชื่อมต่อหน่วยความจำและวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา อีกคำหนึ่งคือคำว่า “คอนโทรลเลอร์” (Controller) หมายถึงอุปกรณ์ควบคุม ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม โดยที่สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ

3.12.1 ความแตกต่างของไมโครคอนโทรลเลอร์กับไมโครโปรเซสเซอร์

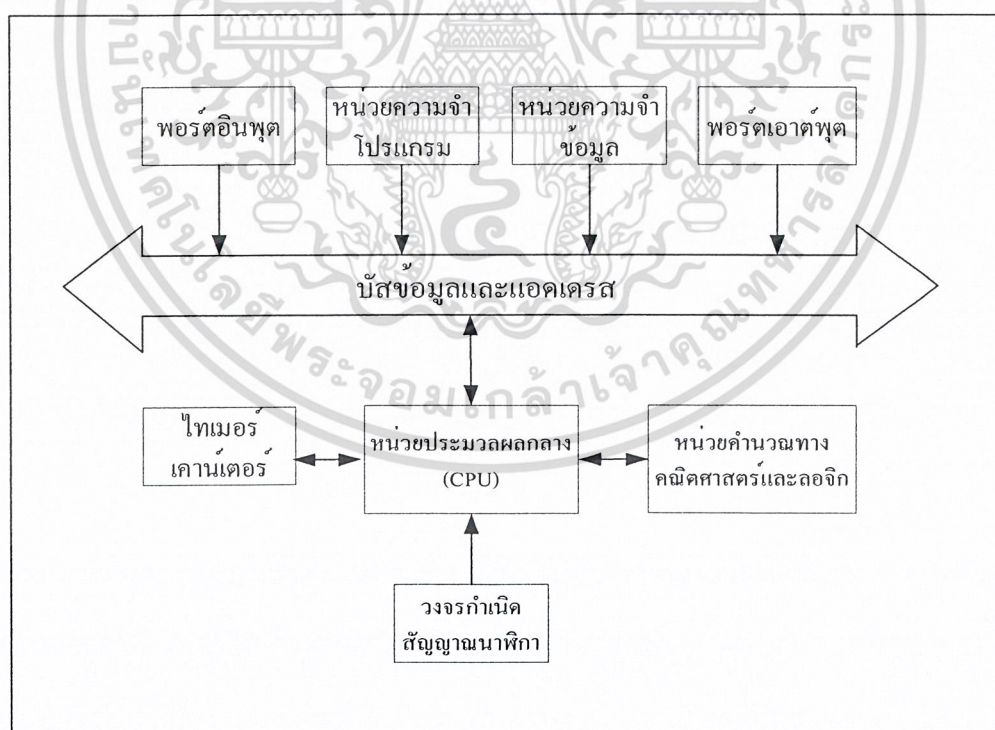
ในรูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างของไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง, หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ และลอจิก บัสข้อมูล และแอดเดรสสำหรับติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก และวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา นั้นหมายความว่า การใช้งานไมโครโปรเซสเซอร์จะต้องเชื่อมต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมมอก และถ้าหากต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ไอซีขยายพอร์ต (port expander) ทำให้การสร้างระบบควบคุมจึงต้องการอุปกรณ์จำนวนมากส่งผลให้ขนาดของระบบใหญ่พอสมควร

ในรูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ มีอุปกรณ์พื้นฐานเหมือนกับไมโครโปรเซสเซอร์ หากแต่จะบรรจุหน่วยความจำโปรแกรม หน่วยความจำข้อมูล และพอร์ตอินพุตเอาต์พุตไว้ภายในพร้อมสรรพ ผู้ใช้งานจึงเพียงแค่เขียนโปรแกรมควบคุมลงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา อาทิ คริสตอล ตัวเก็บประจุ เป็นต้น สุดท้ายเชื่อมต่ออุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตเข้ากับขาพอร์ตเพียงเท่านี้ก็สามารใช้งานได้แล้ว

อย่างไรก็ตามไมโครคอนโทรลเลอร์ก็สามารถเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอกได้เช่นกัน โดยพิจารณาให้หน่วยความจำภายนอก เป็นอุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตตัวหนึ่ง แล้วใช้ขาพอร์ตที่มีอยู่ทำการติดต่อ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครโปรเซสเซอร์



รูปที่ 3.13 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครโปรเซสเซอร์

คุณสมบัติ	ไมโครโปรเซสเซอร์	ไมโครคอนโทรลเลอร์
ขนาดของหน่วยประมวลผลกลาง	ไม่น้อยกว่า 8 บิต	ส่วนใหญ่จะมีขนาด 8 บิต
หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก	มีอยู่ภายใน	มีอยู่ภายใน
วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา	มีอยู่ภายใน	มีอยู่ภายใน
การเชื่อมต่อกับหน่วยความจำโปรแกรม	เชื่อมต่อภายนอกเท่านั้น	ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก
การเชื่อมต่อกับหน่วยความจำข้อมูล	เชื่อมต่อภายนอกเท่านั้น	ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก
การเชื่อมต่อกับพอร์ตอินพุตเอาต์พุต	เชื่อมต่อภายนอกเท่านั้น	มีอยู่ภายในและสามารถขยายได้
ไทเมอร์ / เคนต์เตอร์	ไม่มีในซีพียูขนาดเล็ก	มีอย่างน้อย 1 ตัว ขนาด 8-16 บิต
วอตช์ด็อกไทเมอร์	ไม่มีในซีพียูขนาดเล็ก	มีอย่างน้อย 1 ตัว
จำนวนขาต่อใช้งาน	ไม่น้อยกว่า 40 ขา	มีตั้งแต่ 8 ขาขึ้นไป

3.12.2 โครงสร้างและสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

3.12.2.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

- ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 / ME / 2000
- สามารถเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชของ philips ในอนุกรม P89C51Rx+ และ P89C51Rx2 ตั้งแต่เบอร์ P89C51RA+, P89C51RB+, P89C51RC+, P89C51RD+, P89C51RA2, P89C51RB2, P89C51RC2, P89C51RD2 โดยผ่านทางพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์พีซี สำหรับการใช้งานกับบอร์ด EX-8951 สามารถโปรแกรม เบอร์ P89C51RB2 / RC2 และ RD2 ได้
- สามารถอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมได้ในกรณีที่ไม่มีการป้องกันข้อมูล
- สามารถลบและตรวจสอบข้อมูลว่างในหน่วยความจำโปรแกรมได้
- สามารถป้องกันการอ่านข้อมูลและสามารถปลดล็อกได้
- มีฟังก์ชันตรวจสอบข้อมูล
- รับไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ Intel HEX
- สามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ได้
- เลือกการติดต่อพอร์ตอนุกรมได้สูงสุด 4 พอร์ต
- เลือกอัตราบอดหรือบอดเรตได้ตั้งแต่ 9,600– 115,200 บิตต่อวินาที

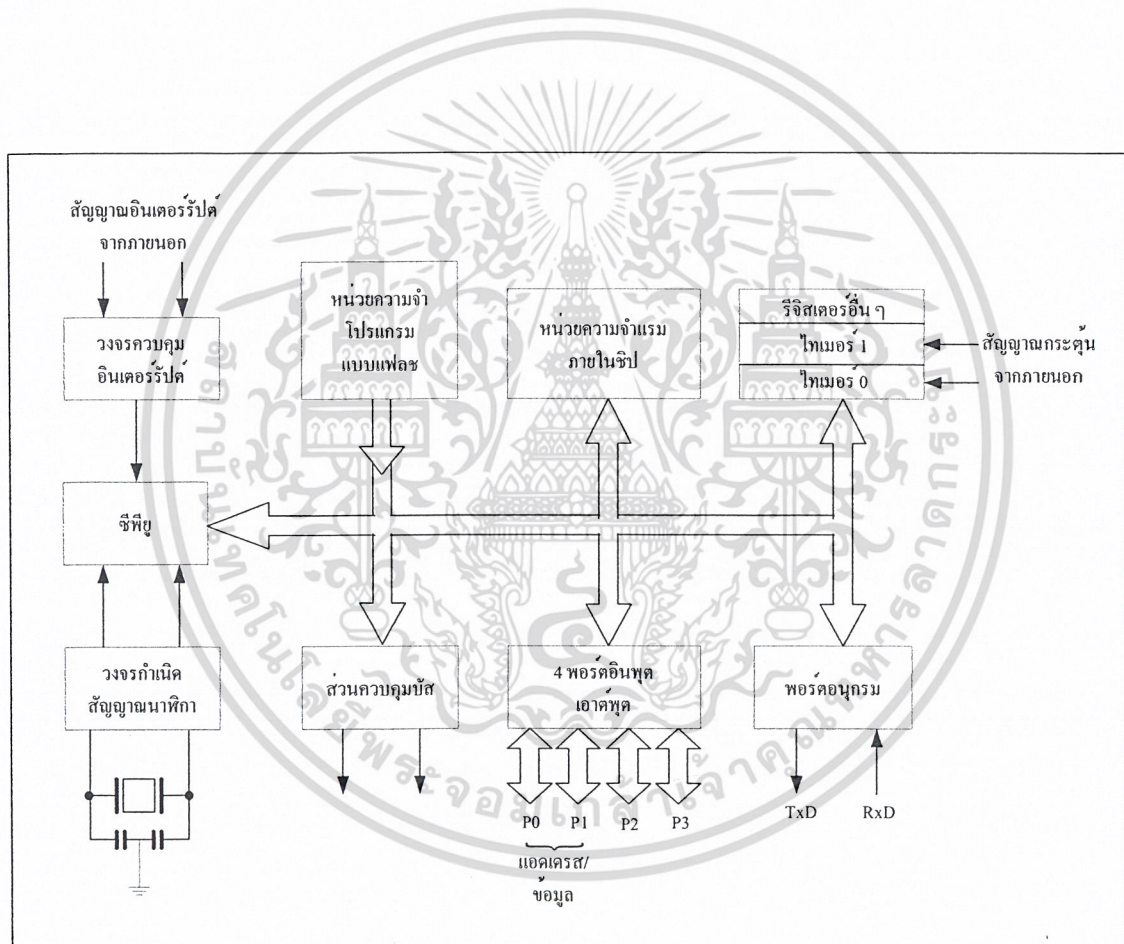
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกความถี่ของสัญญาณนาฬิกาหลักได้ทั้งจากค่าที่กำหนดให้หรือกำหนดใหม่ตามต้องการ

- มีฟังก์ชันตรวจสอบการติดต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับซอฟต์แวร์ และสามารถเชื่อมต่อซ้ำใหม่ได้ตลอดเวลา โดยไม่ต้องปิดโปรแกรม

- มีหน้าต่าง Debug terminal สำหรับการสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับ คอมพิวเตอร์ได้ โดยไม่ต้องปิดโปรแกรม Micro - ISP

ในรูปที่ 3.14 เป็นโครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ในตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดบางส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล P89C51RD2 แต่ละเบอร์ที่ Atmel ผลิตขึ้น และมีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 3.14 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดโดยสรุปบางส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ที่ Atmel ผลิตขึ้นและใช้ในการอ้างอิงในรายงานฉบับนี้

เบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์	หน่วยความจำโปรแกรม	หน่วยความจำข้อมูล	จำนวนไทมเมอร์ / เตาหน้เตอร์ 16 บิต
AT89C1051	แบบแฟลชขนาด 1 กิโลไบต์	แรม 64 ไบต์	1
AT89C2051	แบบแฟลชขนาด 2 กิโลไบต์	แรม 128 ไบต์	2
AT89C51	แบบแฟลชขนาด 4 กิโลไบต์	แรม 128 ไบต์	2
AT89C52	แบบแฟลชขนาด 8 กิโลไบต์	แรม 256 ไบต์	3
AT89C55	แบบแฟลชขนาด 20 กิโลไบต์	แรม 256 ไบต์	3
AT89S8252	แบบแฟลชขนาด 8 กิโลไบต์	แรม 256 ไบต์ อีอีพรอม 2 กิโลไบต์	3
AT89S53	แบบแฟลชขนาด 12 กิโลไบต์	แรม 256 ไบต์	3
P89C51RD2	แบบแฟลชขนาด 64 กิโลไบต์	แรม 1 กิโลไบต์	3

3.12.3 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

หน้าที่การใช้งานของแต่ละขามีดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15

- ขา Vcc เป็นขาป้อนแรงดันไฟเลี้ยง 5+ โวลต์
- ขา GND เป็นขากาวด์
- ขาพอร์ต (P0.0 – P0.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุตพอร์ตสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อกับส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นอยู่ในสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงสามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์ต่ำของหน่วยความจำภายนอก (A0 – A7) และขาข้อมูล (D0 – D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วย เพื่อสลับการทำงานให้เป็นได้ทั้งขาติดต่อกับแอดเดรสและขาข้อมูล

- ขาพอร์ต 1 (P1.0 – P1.7) มี 8 ขา แต่ละขา สามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อกับ นอกจากนั้นในอนุกรม AT89Sxx จะใช้ขา P1.0 เป็นขาอินพุตสำหรับนับค่าของไทมเมอร์ 2 และ P1.1 เป็นขาอินพุตทริกเกอร์ของไทมเมอร์ 2 ในขณะที่ขา P1.4 ถึง P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรมข้อมูลในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ขาพอร์ต 2 (P2.0 – P2.7)** มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วยส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นอยู่ในสถานะปล่อยลอย จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนี้ขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก (A8 – A15)

- **ขาพอร์ต 3 (P3.0 – P3.7)** มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วยส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นอยู่ในสถานะปล่อยลอย จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนี้ขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษดังมีรายละเอียดดังนี้

P3.0 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา RxD

P3.1 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา TxD

P3.2 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา $\overline{\text{INT0}}$

P3.3 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา $\overline{\text{INT1}}$

P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์ไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเทอร์ไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

P3.6 ใช้เป็นขาสัญญาณ WR ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

P3.7 ใช้เป็นขาสัญญาณ RD ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

- **ขา รีเซ็ต (RESET)** ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซ็ตอย่างน้อย 2 แมกซ์ซีไนซ์เกิด โดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาบังทำงานต่อเนื่องไปอย่างปกติ

- **ขา ALE/PROG (Address Latch Enable/Program pulse input)** เป็นขาสัญญาณเพื่อทำหน้าที่ควบคุมการแลตช์ (latch) ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก จากนั้นขานี้ยังใช้เป็นขาสำหรับรับพัลส์ของการโปรแกรมสำหรับโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ในรุ่นที่มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบอีพรอม

- **ขา PSEN (Program Store Enable)** ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ขานี้ 2 ครั้ง ในแต่ละแมกซ์ซีไนซ์เกิด แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอก ขานี้จะ ไม่มีการส่งสัญญาณใด ๆ ออกมา

- **ขา EA/VPP (External Access enable/Programming voltage input)** ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายในหรือภายนอกตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยถ้ามีสถานะเป็น “0” เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก แต่ถ้ามีสถานะเป็น “1” เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ที่ขานี้ยังใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูง สำหรับการโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 แบบแฟลช ต้องการแรงดันสำหรับการโปรแกรมคือ +12 v

- ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

3.12.4 โครงสร้างและการทำงานของพอร์ต

ไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 มีพอร์ตให้ใช้งานทั้งสิ้น 4 พอร์ต คือพอร์ต 0 ถึงพอร์ต 3 แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิต เป็นพอร์ตแบบ 2 ทิศทาง กล่าวคือ สามารถเป็นได้ทั้งอินพุตสำหรับรับสัญญาณเข้าและเอาต์พุตสำหรับส่งสัญญาณข้อมูลออก ทุกพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 มีวงจรแลตช์และวงจรขับตลอดจนบัฟเฟอร์อินพุต ดังแสดงให้เห็นในสถาปัตยกรรมรูปที่ 3.34 ที่พอร์ต 0 และพอร์ต 2 จะใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตสำหรับงานทั่วไป และใช้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก สำหรับพอร์ต 3 ทั้งพอร์ตและพอร์ต 1 บางขา นอกจากจะใช้เป็นขาพอร์ตอินพุตหรือเอาต์พุตตามปกติแล้ว ยังสามารถใช้งานในหน้าที่พิเศษได้อีก ขึ้นอยู่กับว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 เบอร์ใด ดังสรุปได้ในตารางที่ 3.5 ในรูปที่ 3.16 แสดงวงจรภายในของแต่ละพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 แบบแฟลช โดยในรูปที่ 3.16(ก) เป็นวงจรของพอร์ต 0 วงจรแลตช์สามารถกระทำได้อย่างอิสระด้วยสัญญาณที่แยกจากกัน นั่นคือสัญญาณอ่านข้อมูลจากขาพอร์ต และสัญญาณอ่านข้อมูลจากวงจรแลตช์ ส่วนการเขียนข้อมูลมายังพอร์ตต้องส่งสัญญาณมายังขา CLK ของดีฟลิปฟล็อปในขณะที่ข้อมูลจะผ่านมายังขาบัฟเฟอร์ข้อมูลภายในเข้าสู่ขา D ของดีฟลิปฟล็อป ที่พอร์ตนี้มีวงจรมัลติเพล็กซ์สำหรับกำหนดลักษณะการทำงานของพอร์ตว่า ต้องการใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตเอาต์พุตปกติหรือใช้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากที่ขาพอร์ต 0 ไม่มีวงจรพูลอัปภายใน หากมีการนำพอร์ต 0 ไปใช้งานเป็นพอร์ตอินพุตจะต้องต่อตัวต้านทานพูลอัปภายนอกเข้าที่ขาพอร์ต 0 ทุกขาคู่ ในรูปที่ 3.16(ข) เป็นวงจรของพอร์ต 1 ซึ่งมีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับพอร์ต 0 หากแต่ไม่มีวงจรมัลติเพล็กซ์ เนื่องจากพอร์ตนี้จะไม่ใช้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก แต่จะมีวงจรพูลอัปภายในที่แต่ละบิตของพอร์ตนี้แทน ส่วนในรูปที่ 3.16(ค) เป็นวงจรภายในของพอร์ต 2 จะคล้ายกับพอร์ต 0 มาก ต่างกันเพียงมีวงจรพูลอัปเพิ่มเติมเข้ามา ส่วนในรูปที่ 3.16(ง) เป็นวงจรภายในของพอร์ต 3 จะเห็นได้ว่าคล้ายกับพอร์ต 1 มีการเพิ่มเติมวงจรบัฟเฟอร์และวงจรอินพุตเอาต์พุตเมื่อทำงานในฟังก์ชันพิเศษเข้ามา เนื่องจากพอร์ต 3 สามารถนำไปใช้งานในหน้าที่พิเศษได้ทุกขา

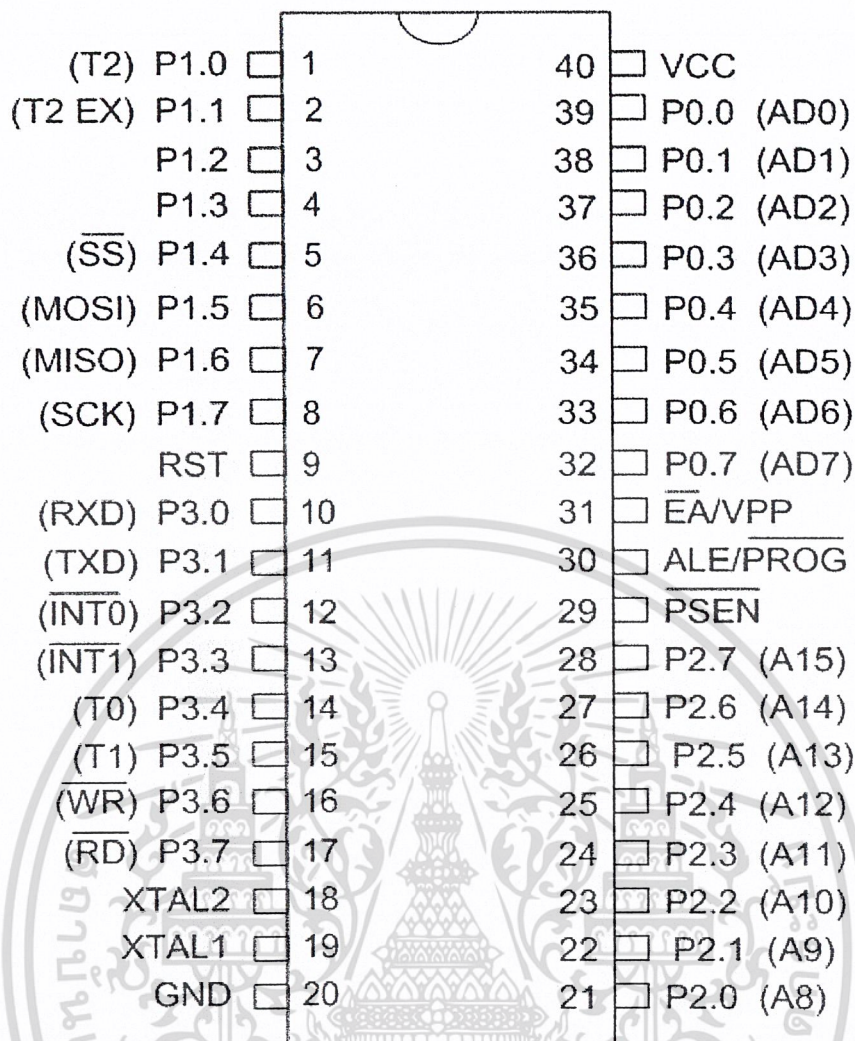
ตารางที่ 3.5 หน้าทีพิเศษของพอร์ต 1 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ของ Atmel

ขา	เบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์	หน้าที่พิเศษ
P1.0	AT89C52/ AT89Sxx	ขา T2 เป็นขาอินพุตนับค่าของไทเมอร์ / เคาน์เตอร์ 2
P1.1	AT89C52/ AT89Sxx	
P1.4	AT89Sxx	ขา SS(Slave Select) เป็นขาเลือกการติดต่อในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์สเลฟ ในระบบการติดต่อแบบ SPI
P1.5	AT89Sxx	ขา MOSI(Master data output, Slave data input)ใช้ในการติดต่อกับพอร์ต SPI
P1.6	AT89Sxx	ขา MISO(Master data input, Slave data output)ใช้ในการติดต่อกับพอร์ต SPI
P1.7	AT89Sxx	ขา SCK(Master clock output) เป็นขาสัญญาณนาฬิกาใช้ติดต่อกับพอร์ต SPI

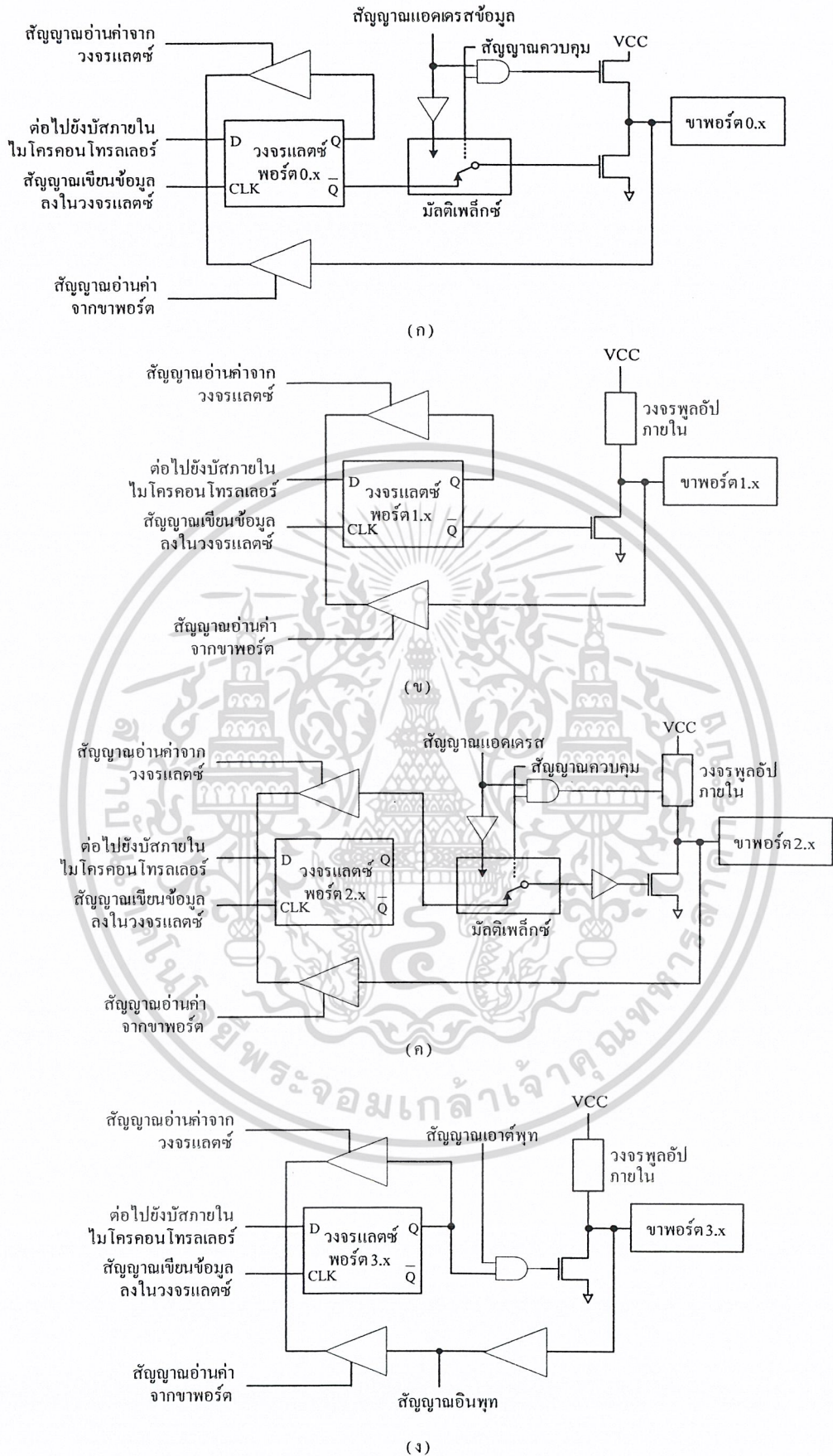
3.12.4.1 การใช้งานเป็นพอร์ตอินพุต

เนื่องจากพอร์ตทั้งหมดของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 สามารถเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทำความเข้าใจถึงการกำหนดลักษณะการทำงานให้แก่พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

ในการกำหนดให้เป็นพอร์ตอินพุต ต้องเริ่มต้นด้วยการเขียนข้อมูล “1” มาที่แต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการใช้งานเป็นอินพุต เพื่อหยุดการทำงานของเฟตที่ใช้ในการจับสัญญาณเอาต์พุตของบิตนั้น ๆ ทำให้ขาสัญญาณของพอร์ตเชื่อมต่อเข้ากับวงจรพูลอัพภายในโดยตรง ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีลอจิกเป็น “1” สามารถรับสัญญาณลอจิก “0” จากอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย สัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกจะถูกส่งเข้ามาแล้วเก็บไว้ในวงจรบัฟเฟอร์ภายในพอร์ต แล้วรอให้ซีพียูมาอ่านค่าเข้าไป เมื่อเป็นเช่นนี้ อุปกรณ์ภายนอกที่เชื่อมต่อกับพอร์ตอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 ควรกำหนดให้ทำงานในสภาวะลอจิก “0” จะดีและสะดวกที่สุด (ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์อินพุตที่เชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ แทบทั้งหมดทำงานที่ลอจิก “0” แล้ว)



รูปที่ 3.15 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ P89C51RD2



รูปที่ 3.16 วงจรภายในของพอร์ตทุกพอร์ตในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12.4.2 การใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุต

โดยปกติแล้วขาพอร์ตจะกำหนดให้มีลักษณะเป็นเอาต์พุตอยู่แล้ว ดังนั้นจึงสามารถส่งข้อมูลออกไปได้อย่างง่ายดายและตรงไปตรงมา กล่าวคือ เมื่อต้องการส่งข้อมูล “0” ออกไปทางเอาต์พุตก็ให้เขียนข้อมูล “0” ไปยังวงจรถ่ายแปลง ซึ่งก็จะส่งต่อไปขับเพดทำให้เพดทำงานที่ขาพอร์ตที่กำหนดให้ทำงานก็จะเกิดลอจิก “0” ขึ้นในทางตรงข้ามเมื่อต้องการส่งข้อมูล “1” ออกไป ก็ให้เขียนข้อมูล “1” ไปยังวงจรถ่ายแปลง วงจรขับก็จะหยุดทำงาน ทำให้ที่ขาพอร์ตเชื่อมต่อกับวงจรถ่ายแปลงในเกิดเป็นลอจิก “1” ที่ขาพอร์ตนั้น ซึ่งจะคล้ายกับการกำหนดให้เป็นขาอินพุตมากเพียงแต่แตกต่างกันที่กระบวนการในการเคลื่อนย้ายข้อมูล โดยถ้าเป็นอินพุตจะมีสัญญาณมาอ่านข้อมูลที่บัฟเฟอร์ แต่ถ้าเป็นเอาต์พุตจะไม่มี การอ่านข้อมูลที่บัฟเฟอร์แต่อย่างใด เว้นแต่ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบข้อมูลที่ส่งออกมาทางเอาต์พุต

เมื่อใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุตแต่ละขา (หรือแต่ละบิต) ของแต่ละพอร์ตมีความสามารถในการจ่ายกระแสหรือที่เรียกว่า กระแสซอร์ส (source current) ได้สูงสุด 10 mA และทุกขาารวมกันในแต่ละพอร์ต (ทั้ง 8 บิต) สูงสุด 26 mA สำหรับพอร์ต 0 และ 15 mA สำหรับพอร์ต 1– 3 ในกรณีที่ใช้งานทุกพอร์ตเอาต์พุตจะสามารถจ่ายกระแสได้รวมกันสูงสุด 71 mA ดังนั้นในการใช้งานเป็นพอร์ตเอาต์พุตเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการจ่ายกระแส จึงควรต่อวงจรบัฟเฟอร์ทางเอาต์พุตเพื่อช่วยในการขับกระแสอีกทางหนึ่ง

3.12.4.3 การอ่านค่าลอจิกจากพอร์ต

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 สามารถอ่านค่าลอจิกจากพอร์ตได้ 2 ลักษณะ คือ อ่านจากขาพอร์ตโดยตรง และอ่านจากวงจรถ่ายแปลงของแต่ละพอร์ต ในกรณีที่พอร์ตต่อกับขาเบสทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ตัวนั้นต่อลงกราวด์ หากมีการส่งข้อมูล “1” ไปยังทรานซิสเตอร์ จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานสถานะลอจิกที่ขาพอร์ตจะเป็น “0” เนื่องจากเมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานจะเสมือนว่าขาพอร์ตนั้นถูกต่อลงกราวด์ ทำให้หากอ่านค่าลอจิกที่ขาพอร์ตจะได้ผลตรงข้ามกับที่ส่งออกมา แต่ถ้าหากทำงานอ่านค่าลอจิกที่วงจรถ่ายแปลงจะได้ค่าที่ตรงกับค่าที่ต้องการส่งจริง ดังนั้นในการอ่านค่าลอจิกจากพอร์ตจึงต้องเลือกวิธีการให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่นำมาต่อด้วย

3.12.5 จังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2

ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 จะต้องทำความเข้าใจถึงจังหวะการทำงานของซีพียูและลำดับขั้นตอนการประมวลผลคำสั่ง ในการประมวลผลคำสั่งของซีพียูจะมีขั้นตอนหลัก ๆ 2 ขั้นตอนคือ *กระบวนการเฟตช์ (fetch) เป็นการเรียกคำสั่งออกจากหน่วยความจำโปรแกรมแล้วทำการแปลรหัสคำสั่งนั้นเป็นภาษาเครื่องเพื่อเตรียมการประมวลผล* ขั้นตอนต่อมา คือ กระบวนการเอ็กซิวคิวต์ (execute) เป็นการกระทำตามคำสั่งที่กำหนดหรือตามที่เฟตช์ขึ้นมาโดยกระบวนการก่อนหน้านี้เมื่อทำการเอ็กซิวคิวต์คำสั่งเรียบร้อยแล้วจะไปเริ่มกระบวนการเฟตช์คำสั่งใหม่ต่อไป เมื่อเริ่มจ่ายไฟให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเกิดการรีเซตในลักษณะ ที่เรียกว่า เพาเวอร์ออนรีเซต (power on reset) ซีพียู

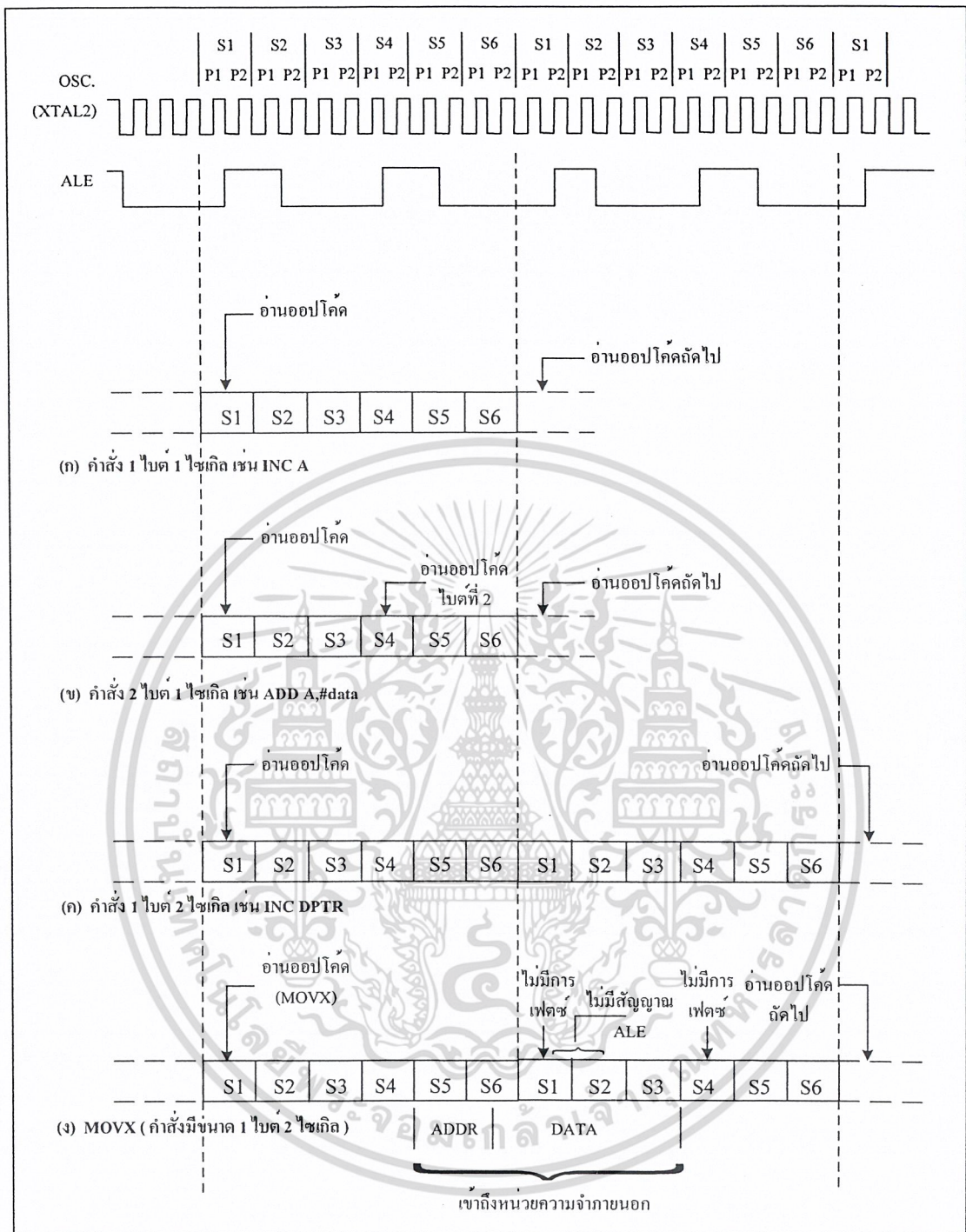
เริ่มต้นการทำงานที่แอดเดรส 0000H ของหน่วยความจำโปรแกรม จังหวะการทำงานของซีพียูจะเป็นไปตามรูปแบบ โดยได้รับการกำหนดมาจากรอบการทำงานหรือแมชชีนไซเคิล (machine cycle)

ในรูปที่ 3.17 เป็นไดอะแกรมเวลาแสดงจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ P89C51RD2 โดยใน 1 รอบการทำงานหรือแมชชีนไซเคิลจะแบ่งย่อยออกเป็น 6 สเตต (state) กำหนดชื่อเป็น S1 – S6 ในแต่ละสเตตมีค่าเวลาเท่ากับ 2 คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ 12 MHz จะมีคาบเวลาเท่ากับ 1 ms คาบเวลาทั้งสองภายในหนึ่งสเตตจะเรียกว่า เฟส 1 (phase 1) และ (phase 2)

ในรูป 3.17(ก) และ (ข) จะเป็นการเอ็ชชีควิต์คำสั่งที่ใช้เวลา 1 ไซเคิล เริ่มต้นที่สเตต 1 จะเป็นการอ่านค่าออปโค้ด อันเป็นกระบวนการแลตซ์ค่าของออปโค้ดส่งไปให้รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register: IR) การเฟตซ์ครั้งที่ 2 จะเกิดขึ้นที่สเตต 4 ภายในแมชชีนไซเคิลเดียวกัน ในกรณีที่ เป็นคำสั่งไบต์เดียว การเฟตซ์ครั้งที่ 2 ภายในแมชชีนไซเคิลเดียวกันจะถูกตัดทิ้งไป ในคำสั่งที่มีใช้เวลา 1 ไซเคิล จะสิ้นสุดการทำงานลงในสเตต 6 ของแมชชีนไซเคิลเดียว

ในกรณีที่คำสั่งใช้เวลา 2 ไซเคิล การทำงานขอคำสั่งนั้นจะสิ้นสุดลงในสเตต 6 ของแมชชีนไซเคิลที่ 2 ดังในไดอะแกรมรูปที่ 3.17(ค) สำหรับในการกระทำคำสั่ง MOVX ซึ่งเป็นคำสั่งขนาด 1 ไบต์ 2 ไซเคิล จะไม่มีการเฟตซ์เกิดขึ้นในไซเคิลที่ 2 ของคำสั่ง นี้ เนื่องจากซีพียูจะไปทำการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกดังแสดงในไดอะแกรมรูปที่ 3.17(ง) จะเห็นได้ว่า เวลาในการเอ็ชชีควิต์จะไม่ได้ขึ้นอยู่กับว่าทำการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายในหรือภายนอก





รูปที่ 3.17 ไซเคิลการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13 จอแสดงผล

รายละเอียดเกี่ยวกับ โมดูล LCD (Liquid Crystal Display)

ในโมดูล LCD ที่ใช้กันโดยทั่ว ๆ ไปมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้

1. **ตัวแสดงผล (Display)** ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็น โดยอาศัยแสงจากภายนอก ซึ่งจะเปิดตัวเองกับแสงในส่วนที่เป็นตัวกระจกบรรจุผลึก
2. **ตัวควบคุม (Controller)** เป็นตัวรับข้อมูลภายนอก มาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้ใช้ชิปควบคุมโดยเฉพาะชิปที่นิยมใช้คือเบอร์ HD61830 และ HD44780 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD อักษรละ ส่วน LCD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟฟิก
3. **ตัวขับ (Driver)** เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุม มาขับให้ตัวแสดงผลข้อมูล ตามที่กำหนด ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับนี้ ได้แก่ เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

3.13.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD

ในโครงงานนี้เราใช้ LCD แบบอักษร จึงขอยกตัวอย่าง โครงสร้างและการใช้งาน LCD อักษรที่ใช้ชิปเบอร์ HD44780 เป็นตัวควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วย

1. บัฟเฟอร์อินพุตเอาต์พุต (Buffer อินพุต output) เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก เพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม
2. รีจิสเตอร์คำสั่ง (Instruction Register: IR) เป็นรีจิสเตอร์ที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อถ่ายทอดต่อไปยังหน่วยความจำ ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษรเพิ่มเติมในแรมเก็บตัวอักษร
3. แรมเก็บข้อมูลแสดงผล (Display Data Ram: DDRAM) เป็นหน่วยความจำที่มีหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR ตัวควบคุมจะนำข้อมูลใน DDRAM ไปเปิดตาราง (look up-table) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรวมและแรมเก็บตัวอักษร เพื่อที่จะนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล
4. รมเก็บตัวอักษร (Character Generator ROM: CGROM) เป็นหน่วยความจำที่รวมที่ใช้เก็บข้อมูลตัวอักษรหรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7200 บิต โดยจะถูกอ่านค่าของข้อมูลใน DDRAM
5. แรมเก็บตัวอักษร (Character Generator RAM: CGRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรใน CGRAM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้นทำได้เช่นเดียวกับ CGRAM คือเขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุมจะมาอ่านค่าจาก CGRAM เอง
6. แฟลค BUSY เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานการณ์ทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่า ตัวควบคุมพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้นก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมต้องตรวจสอบสถานะของแฟลค BUSY นี้เสียก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13.2 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD ในโครงการ

โมดูล LCD ที่ใช้ในโครงการนี้ ได้อ้างอิงใน โมดูล DMC 162 ซึ่งเป็น LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา

ขา 1 Vss ต่อลงกราวด์

ขา 2 Vdd ต่อไฟเลี้ยง +5V

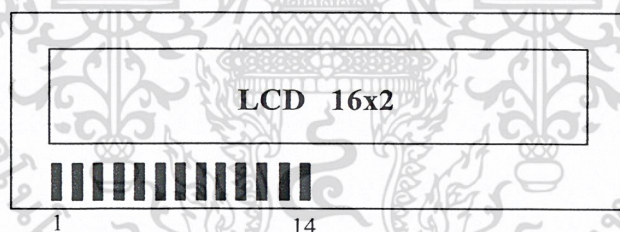
ขา 3 VO เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

ขา 4 RS เป็นขาอินพุต ใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น “0” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง และถ้าเป็น “1” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

ขา 5 R/W เป็นขาที่ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD ถ้าเป็น “0” เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นการอ่านข้อมูล

ขา 6 E เป็นขาที่สั่งให้ LCD ทำงาน ถ้าเป็น “1” จะเป็นการสั่งให้ทำงาน ส่วน “0” เป็นการหยุดทำงาน

ขา 7-14 เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอกมีขนาด 8 บิต



รูปที่ 3.18 การจัดขาของจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13.3 คำสั่งควบคุม LCD

ในการเขียนคำสั่งควบคุม LCD เราต้องกำหนดลอจิกให้กับขา RS และ R/W ในลักษณะที่ต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 3.6 คำสั่งควบคุมการทำงานของ LCD

คำสั่ง	รหัส									
	RS	R/W	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Clear display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Return home	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1*
Entry mode set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S
Display on/off control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B
Cursor or display shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	*	*
Function set	0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*
Set CGRAM address	0	0	0	1	ACG					
Set DDRAM address	0	0	1	ADD						
Read busy flag & address	0	1	AC							
Write data to CG or DD RAM	1	0	Write Data							
Read data from CG or DD RAM	1	1	Read Data							

1. คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (clear display)

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อควบคุมเอ็กซ์ทริคต์คำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/D ให้เป็น “1”

2. คำสั่ง RETURN HOME

ต้องกำหนดให้บิต 1 ของข้อมูล “1” เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล แต่ข้อมูลบนจอไม่เปลี่ยนแปลง อาจจะทำให้คำสั่งเป็น 01H หรือ 02H ก็ได้

3. คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล (entry mode set)

MSB					LSB		
0	0	0	0	0	1	I/D	S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากบิต S เป็น “1” ตัวเคอร์เซอร์ จะอยู่กับที่ แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่ถ้าหากบิตนี้เป็น “0” เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อน ไปทางขวามือ

บิต I/D เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว ทำให้แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็น “0” จะลดลง

ดังนั้น ข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ ได้แก่ 04-07H และที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึง กำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อน ไปทางขวา และแอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น

4. คำสั่งควบคุมการแสดงผล

MSB					LSB		
0	0	0	0	1	D	C	B

บิต D ใช้ควบคุมการเปิด ปิด จอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “1” จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะเป็นการปิดจอแสดงผล

บิต C ใช้ควบคุมการแสดงผลตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนจอแสดงผล ต้องกำหนดให้เป็นบิต “1” ถ้ากำหนดให้เป็น “0” จะเป็นการปิดหรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น “1” เคอร์เซอร์จะกระพริบ ดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H-0FH แต่ที่ใช้บ่อยคือ 0CH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์ และ 0FH เป็นการเปิดจอแสดงผล แสดงเคอร์เซอร์และสั่งให้เคอร์เซอร์กระพริบ

5. คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

MSB					LSB		
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์ และตัวอักษรบนจอแสดงผลขึ้นอยู่กับกำหนบบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

S/C	R/L	ลักษณะการเลื่อน	ข้อมูลคำสั่ง
0	0	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางซ้าย	10H-13H
0	1	เลื่อนเคอร์เซอร์ไปทางขวา	14H-17H
1	0	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางซ้าย	18H-1BN
1	1	เลื่อนตัวอักษรใหม่ไปทางขวา	1CH-1FH

6. คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

MSB				LSB			
0	0	1	DL	N	F	*	*

บิต DL ใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อการผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต แต่ถ้าเป็น “1” จะเป็นแบบ 8 บิต

บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น “0” จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น “1” จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลสามารถแสดงได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลมากกว่า 2 บรรทัด ก็กำหนดบิต N ให้เป็น “1”

บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรให้การแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x7 และถ้าเป็น “1” จะแสดงผลเป็น 5x10 จุด

ข้อมูลคำสั่งที่ใช้บ่อยคือ 38H เป็นการกำหนดให้โมดูล LCD ทำงานในแบบ 8 บิต แสดงผล 2 บรรทัด และเลือกความละเอียด 5x7 จุด

จุดที่น่าสังเกต คือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด แม้จะมีบรรทัดการแสดงผลเพียง 1 บรรทัด จะต้องกำหนด N ให้เป็น “1” เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM แบ่งออกเป็น 2 ช่อง คือ 00H และ 40H

7. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้เป็นบิต 7 เป็น “0” บิต 6 เป็น “1” ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือ จะแทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ ก่อนที่อ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่าง 00H-3FH

8. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต 7 ต้องเป็น “1” และข้อมูลอีก 7 บิตที่เหลือ จะเป็นค่าแอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 8CH-0FFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสวิ่งขึ้นกับการกำหนดสถานะที่บิต N ด้วย หากบิต N เป็น “0” แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H-0CFH และถ้าเป็น “1” แอดเดรสของ DDRAM จะมี 2 ช่วง คือ 8CH-87H และ 0C0H-0C7H

9. คำสั่งอ่านแฟล็ก BUSY และแอดเดรส

MSB				LSB			
BF	A	A	A	A	A	A	A

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านแฟล็ก BUSY (BF) โดยแฟล็กนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น “0” แสดงว่าตัวควบคุม LCD พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น “1” แสดงว่า ขณะนี้ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายใน หรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่ง

เมื่อต้องการอ่านแฟลคต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “1” แต่สัญญาณที่ขา RS ยังต้องเป็น “0” เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง

นอกจากนี้ ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูลแอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย โดยบิต 0-6 เป็นค่าของข้อมูลของแอดเดรสที่ต้องการอ่าน

3.13.4 การเขียนคำสั่งและข้อมูลให้แก่โมดูล LCD

ในการเขียนข้อมูลเพื่อควบคุมให้โมดูล LCD แสดงผลตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ต้องส่งคำสั่ง (instruction) แล้วกำหนดโหมดการทำงานให้แก่โมดูล LCD ก่อน จากนั้นจึงค่อยส่งข้อมูล (data) ที่ต้องการแสดงผล เนื่องจากบัสข้อมูลของโมดูล LCD มี 8 เส้น คือ D0-D7 และใช้เป็นทางผ่านของทั้งคำสั่งและข้อมูล ดังนั้นในการส่งคำสั่งและข้อมูลจึงต้องกำหนดสัญญาณลจิกที่ขา RS ถ้าหากที่ขา RS ได้ลจิก “0” หมายความว่า ข้อมูลที่ป้อนให้แก่โมดูล LCD ขณะนั้นเป็นคำสั่ง ในทางตรงข้ามหากขา RS ได้รับลจิก “1” ข้อมูลที่ป้อนให้ขณะนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้ในการแสดงผล

เมื่อต้องการเขียนข้อความหรืออ่านข้อมูลใน CGRAM และ DDRAM เริ่มต้นต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน โดยใช้คำสั่งเลือกแอดเดรส จากนั้นกำหนดให้ขา RS เป็น “1” เพื่อแจ้งให้ตัวควบคุมภายใน โมดูล LCD ทราบว่าข้อมูลที่ปรากฏต่อไปนี้เป็นข้อมูลปกติไม่ใช่คำสั่ง

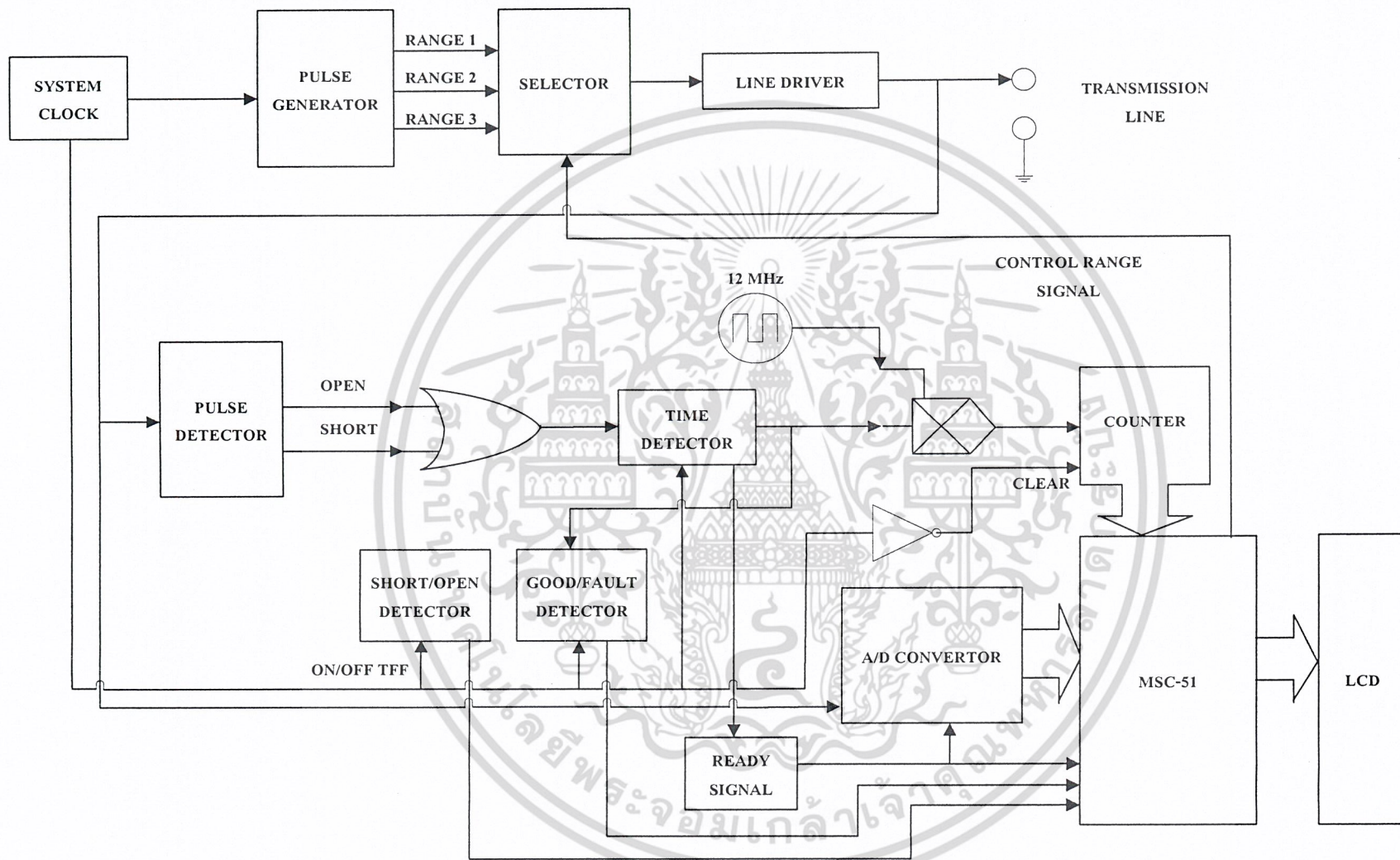
ในกรณีที่ต้องการอ่านข้อมูลต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น “1” ข้อมูลขนาด 8 บิต (หรือ 4 บิต) ก็จะปรากฏบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลที่อ่านออกมาได้ จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสของ CGRAM หรือ DDRAM ตามต้องการ

ในกรณีที่ต้องการเขียนข้อมูล เมื่อกำหนดแอดเดรสและป้อนลจิก “1” ให้ขา RS แล้วกำหนดให้ขา R/W เป็น “0” ข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลจะถูกเขียนลงในรีจิสเตอร์ DR จากนั้นจึงถ่ายทอดลงใน DDRAM ต่อไป

3.13.5 จังหวะการทำงานของ LCD โมดูล

ในการติดต่อกับโมดูล LCD จะต้องมีการหน่วงเวลาหลังจากที่ทำการส่งรหัสคำสั่งหรือข้อมูล เนื่องจากต้องรอให้คอนโทรลเลอร์ภายใน LCD โมดูล แปลความหมายของรหัสคำสั่งและทำงานตามคำสั่งให้เรียบร้อยก่อน จากนั้นจึงจะรับข้อมูลหรือดำเนินการต่อไป

ดังนั้น ในการใช้งาน ผู้เขียนโปรแกรมต้องมีโปรแกรมเพื่อหน่วงเวลารอให้ LCD โมดูล พร้อมทำงานด้วย โดยเมื่อเริ่มจ่ายไฟให้แก่ LCD ต้องรอประมาณ 100 ms เพื่อให้ LCD ทำการเตรียมความพร้อม หลังจากนั้นก็จะกำหนดลจิกให้กับขา RS และหน่วงเวลาอีกประมาณ 2 ms เพื่อให้คอนโทรลเลอร์ของ LCD แปลความหมายของลจิกที่ขา RS ว่าเป็นรหัสข้อมูลจะแสดงผลหรือคำสั่ง จากนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลมารอที่ขาบัสข้อมูล D0-D7 ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการส่งสัญญาณพัลส์ไปที่ขา E เพื่อให้ LCD รับเอาข้อมูลจากบัสเข้าไป โดยพัลส์ที่ป้อนที่ขา E จะต้องเป็นพัลส์ขอบขาขึ้น จากนั้นก็ทำการหน่วงเวลา 2 ms



รูปที่ 3.19 บล็อกไดอะแกรมรวม

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

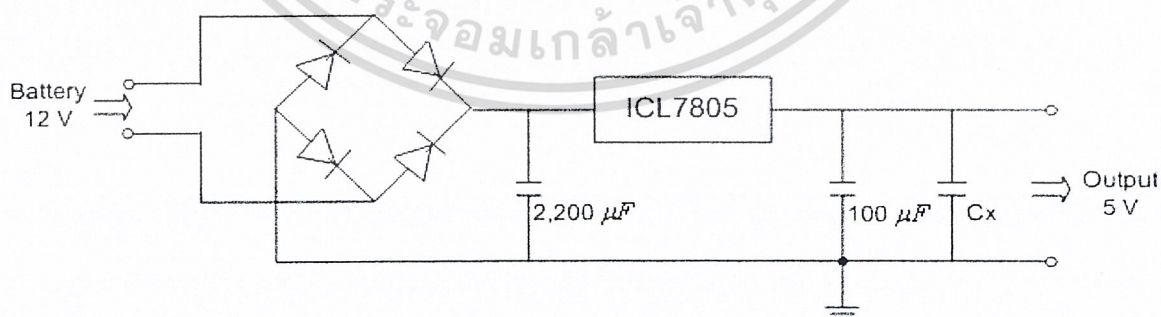
4.1 การออกแบบวงจร

วงจรจะแบ่งเป็น

- 1) วงจรแปลงแรงดัน แบ่งเป็น 2 วงจร
 - 1.1) วงจรแปลงแรงดัน (ICL7805)
 - 1.2) วงจรแปลงแรงดัน (ICL76605)
- 2) วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (#74HC123, #555)
- 3) วงจรเล็อกสัญญาณ (#74150, #74LS04)
- 4) วงจรขับสัญญาณ (#LM6365, #LH0002)
- 5) วงจรตรวจจับสัญญาณ (#LM710)
- 6) วงจรรวมสัญญาณ (#74HC32)
- 7) วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ (#74HC74, #74HC14)
- 8) วงจรคูณสัญญาณ (#74LS08, #74HC393, Oscillator 24 MHz, #74HC14)
- 9) วงจรนับ (#74HC393)
- 10) วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (#ADC0820)
- 11) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (AT89S8252)
- 12) จอแสดงผล

4.1.1 วงจรแปลงแรงดัน

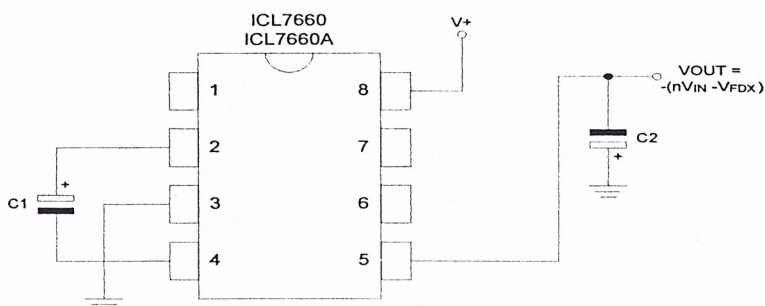
4.1.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5V (ICL7805)



รูปที่ 4.1(ก) วงจรแปลงแรงดัน 5V

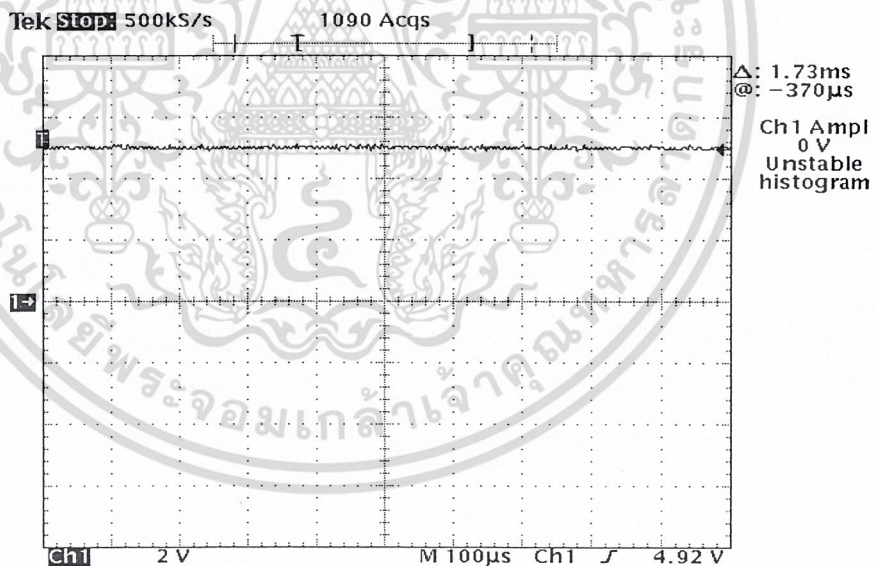
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 วงจรแปลงแรงดัน -12 V (ICL76605)



รูปที่ 4.1(ข) วงจรแปลงแรงดัน -12 V

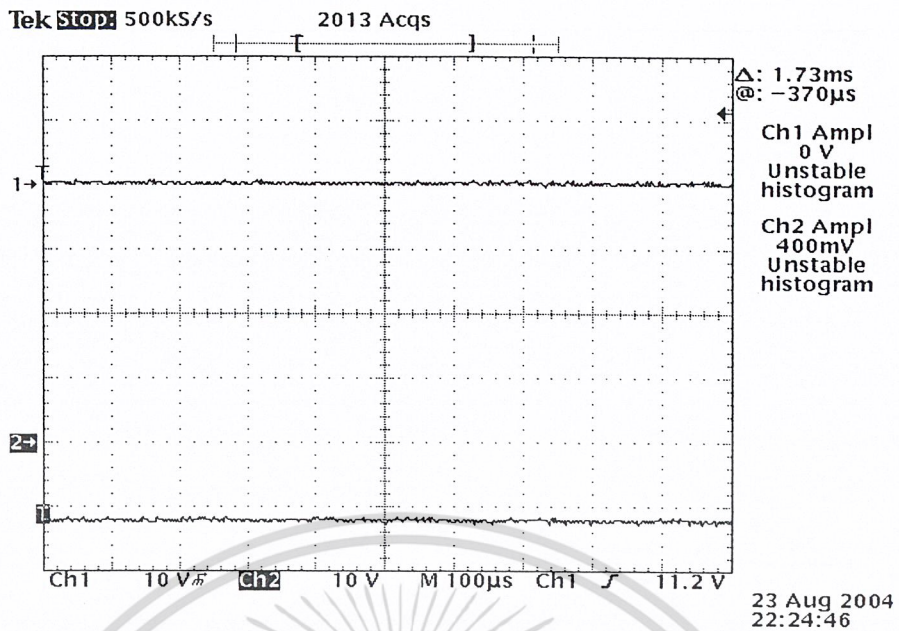
รูปที่ 4.1 วงจรแปลงแรงดัน



23 Aug 2004
22:14:42

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองในส่วนของวงจรแปลงแรงดัน 5 V

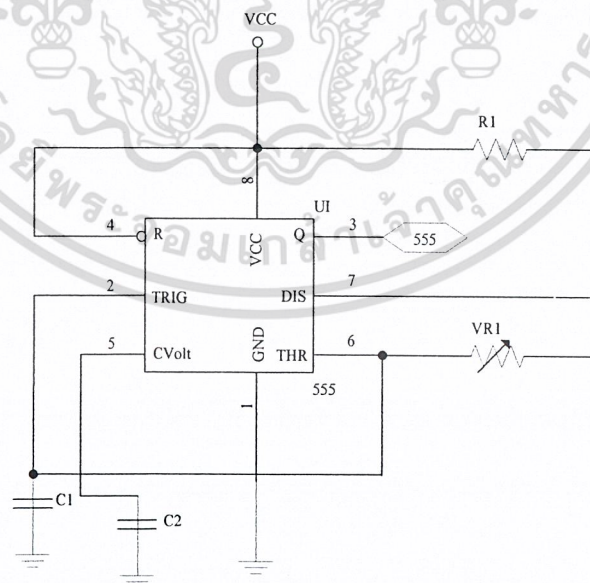
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การทดลองในส่วนของวงจรแปลงแรงดัน -12 V

4.1.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

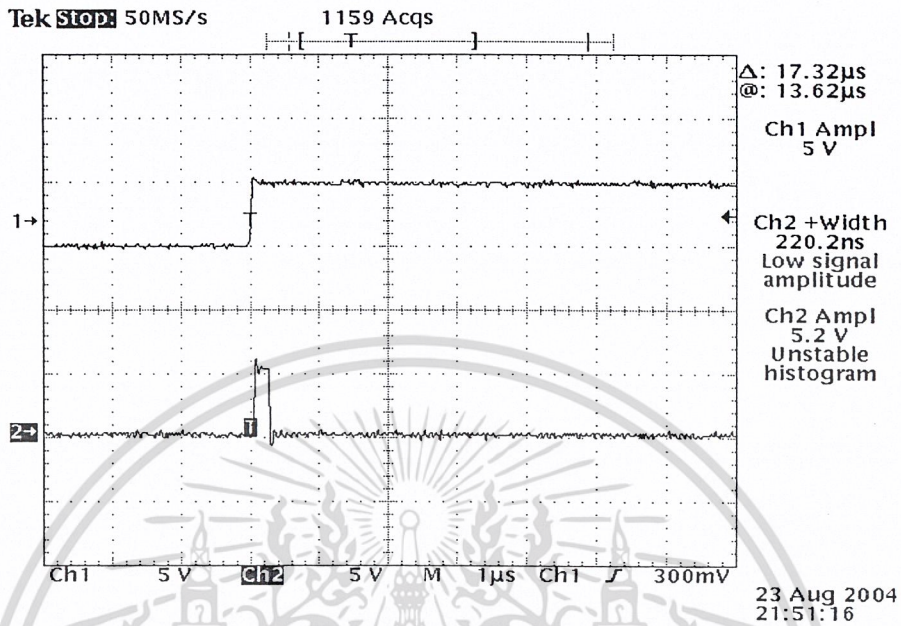
ในวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์นี้จะต้องใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 kHz มาเป็นตัวควบคุมจังหวะการเกิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งเราใช้ IC #555 มาเป็นตัวสร้างสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 kHz ดังรูป



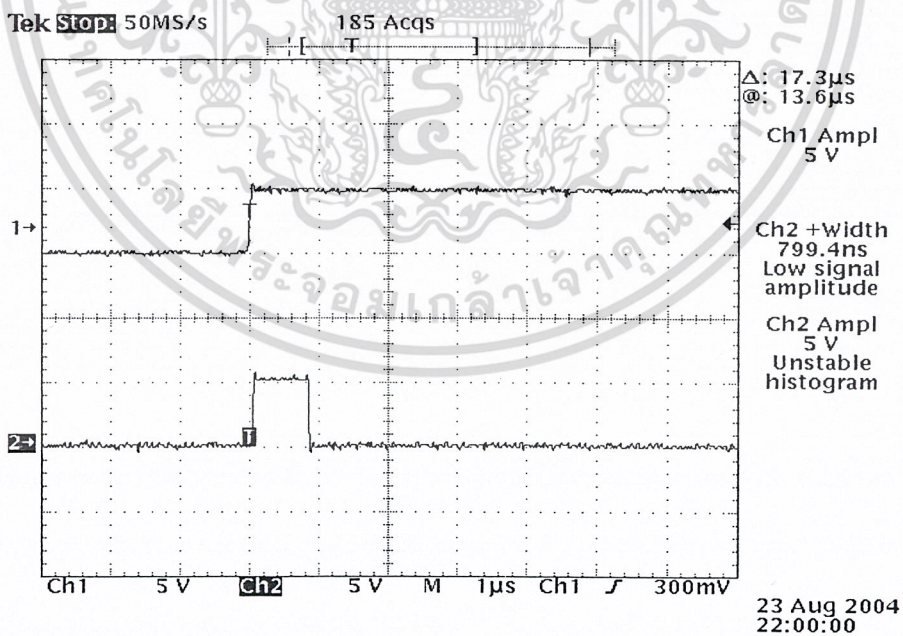
รูปที่ 4.4 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาความถี่ 2 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ทำการออกแบบวงจรแล้ว เราจะทำการปรับแต่ง โดยทำการปรับ VR เพื่อให้ได้ค่าความกว้างของพัลส์ตามที่เรากำหนดจะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.6(ก), 4.6(ข) และ 4.6(ค)

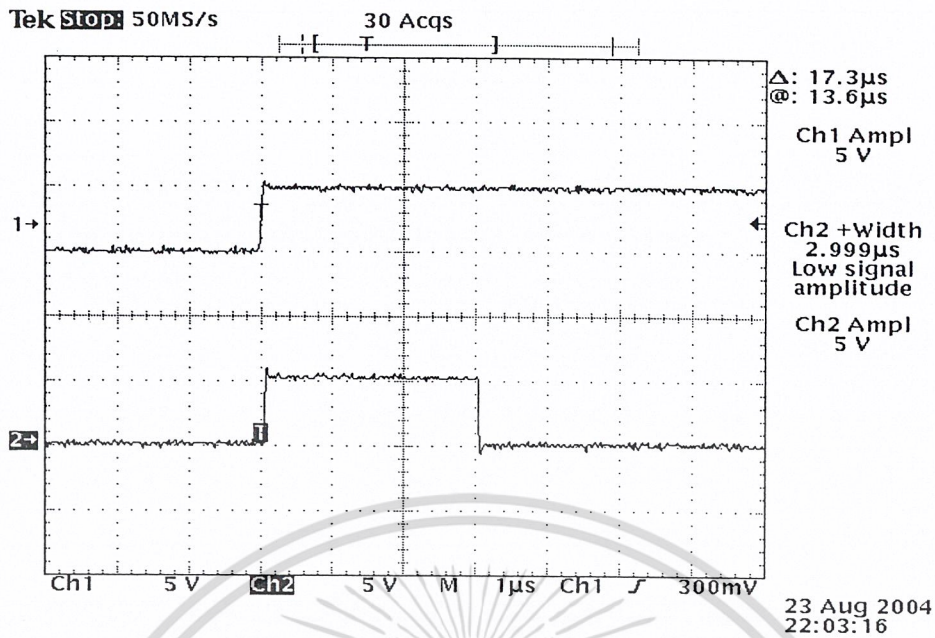


รูปที่ 4.6(ก) สัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (200 nsec)



รูปที่ 4.6(ข) สัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (800 nsec)

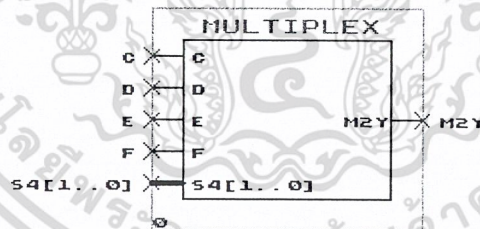
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6(ค) สัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (3 µsec)

4.1.3 วงจรเลือกสัญญาณ

ในวงจรส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดสัญญาณพัลส์ที่จะส่งไปยังวงจรจับสัญญาณ โดยใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ

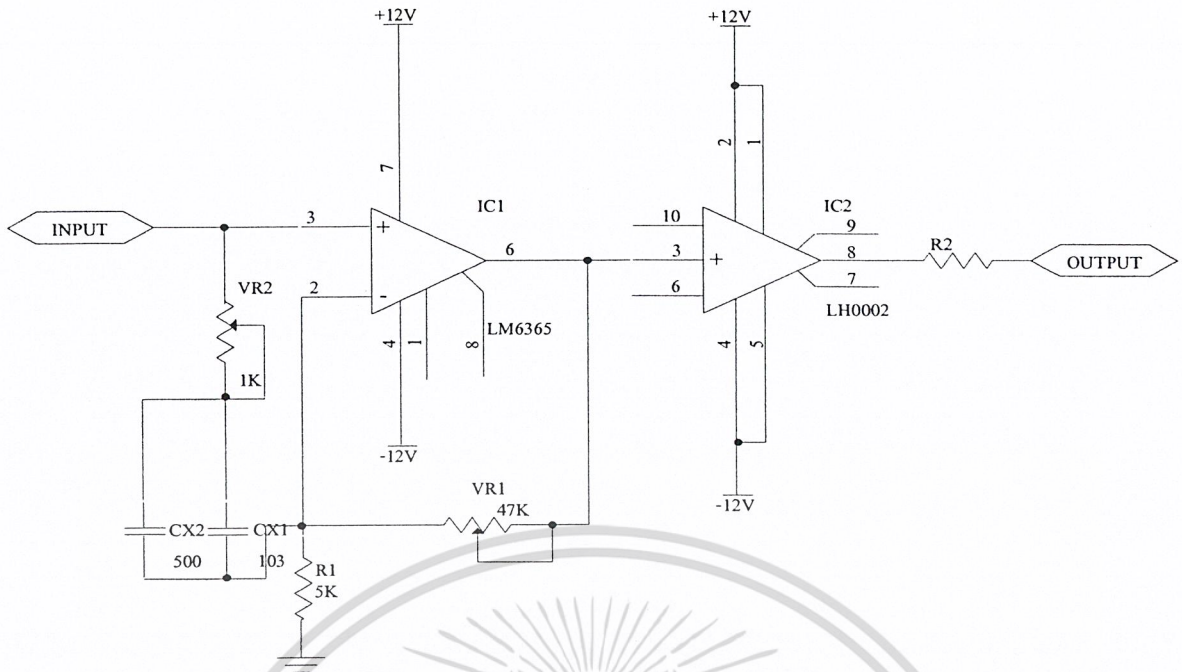


รูปที่ 4.7 วงจรเลือกสัญญาณ

4.1.4 วงจรจับสัญญาณ

ในส่วนของวงจรนี้จะทำหน้าที่ขยายพัลส์ให้มีความแรงเพิ่มขึ้นจากเดิม เพื่อทำการส่งเข้าไปในสายเพื่อให้ได้ระยะทางที่ไกลขึ้น และเป็นส่วนที่สำคัญมากของโครงการนี้ เพราะถ้าสัญญาณที่ออกจากส่วนของวงจรนี้ไม่ได้ หรือมีลักษณะไม่ได้ตามที่ต้องการ จะทำให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาได้ หรืออาจจะตรวจจับได้ค่าที่ผิดพลาดซึ่งเราไม่ต้องการ โดยในส่วนนี้เราจะต้องปรับแต่งให้ละเอียดที่สุด ซึ่งในส่วนนี้เราจะใช้ IC เบอร์ LM6365 และ LH0002

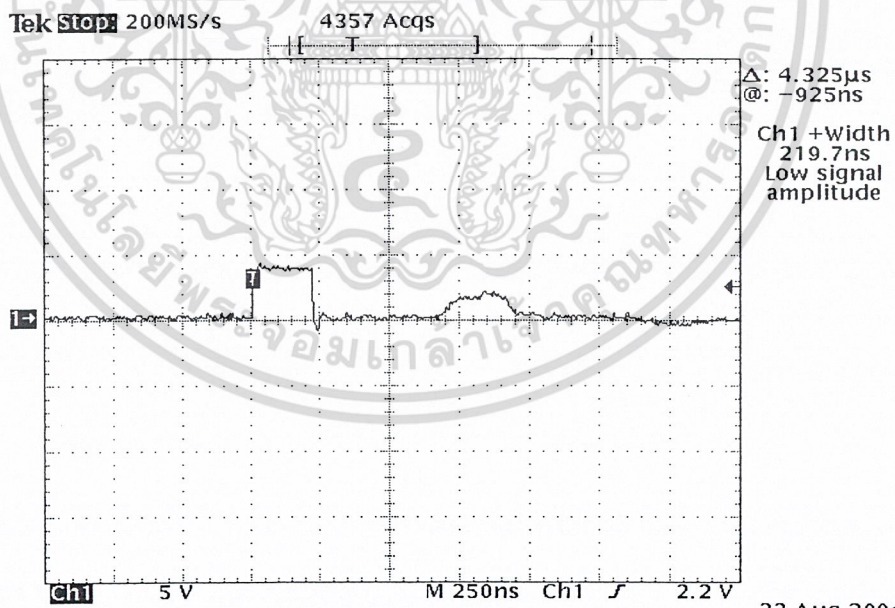
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 วงจรขับสัญญาณ

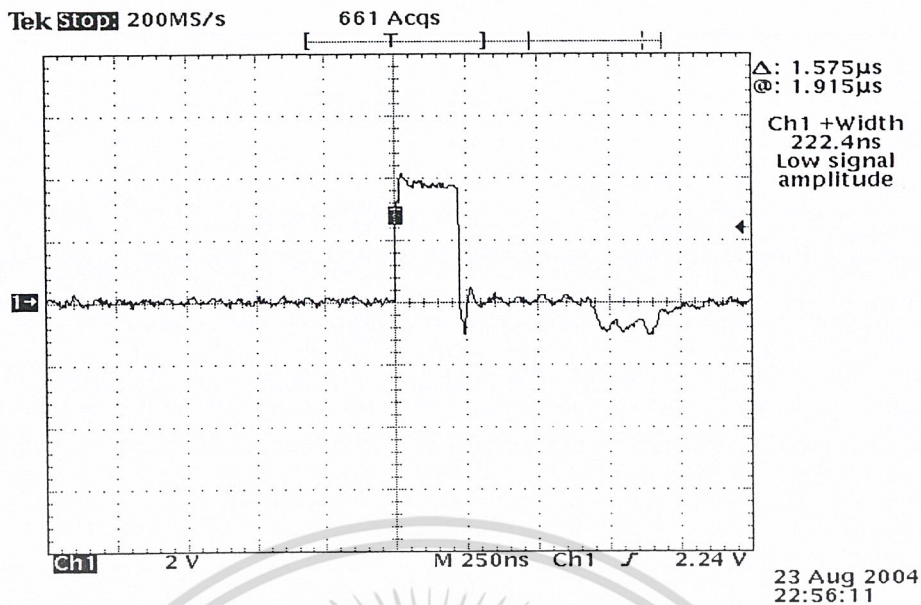
สัญญาณที่ได้จากวงจรขับสัญญาณ เมื่อทำการต่อกับสายทดสอบจะได้ผลการทดสอบ

ดังรูป



รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ส่งไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับมาเมื่อปลายสายทดสอบเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



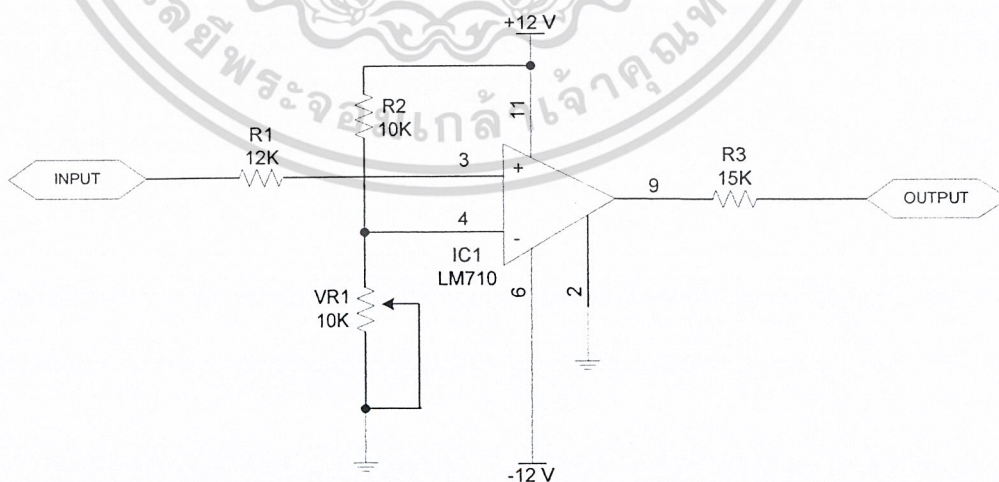
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ส่งไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับมาเมื่อปลายสายทดสอบลัดวงจร

4.1.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

การทำงานของวงจรในส่วนนี้จะใช้ OP-AMP เบอร์ LM710 ซึ่งจะทำงานในลักษณะของวงจรเปรียบเทียบ (Comparator) สัญญาณ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น

4.1.5.1 วงจรตรวจจับพัลส์บวก (Positive Pulse Detector)

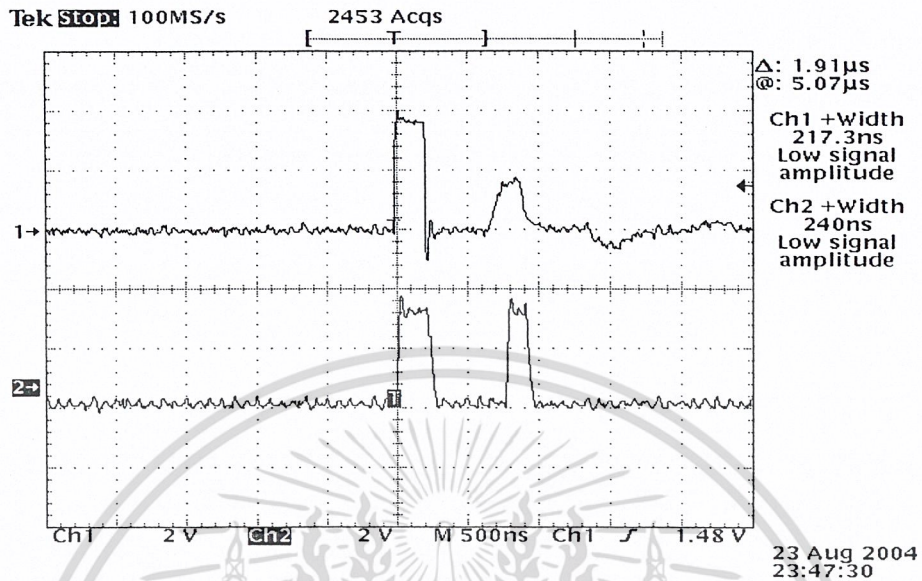
วงจรจะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับแรงดันที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่ามากกว่า วงจรนี้จะให้เอาต์พุตมีค่า 5 V โดยในการออกแบบเราได้ออกแบบให้มีการปรับแต่งได้ง่าย ดังรูป



รูปที่ 4.11 วงจรตรวจจับพัลส์บวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

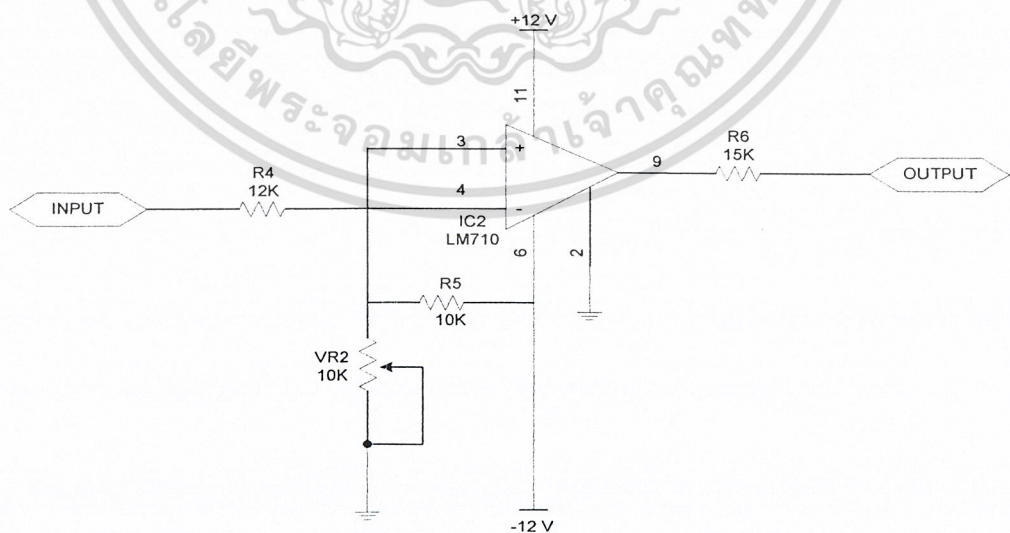
เมื่อเราทำการปรับแต่งและทำการทดลองโดยการส่งสัญญาณ เข้าไปในสาย และทำการเปิดปลายสายจะได้ผลการทดลอง ดังรูป



รูปที่ 4.12 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับพัลส์บวก เปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต

4.1.5.2 วงจรตรวจจับพัลส์ลบ

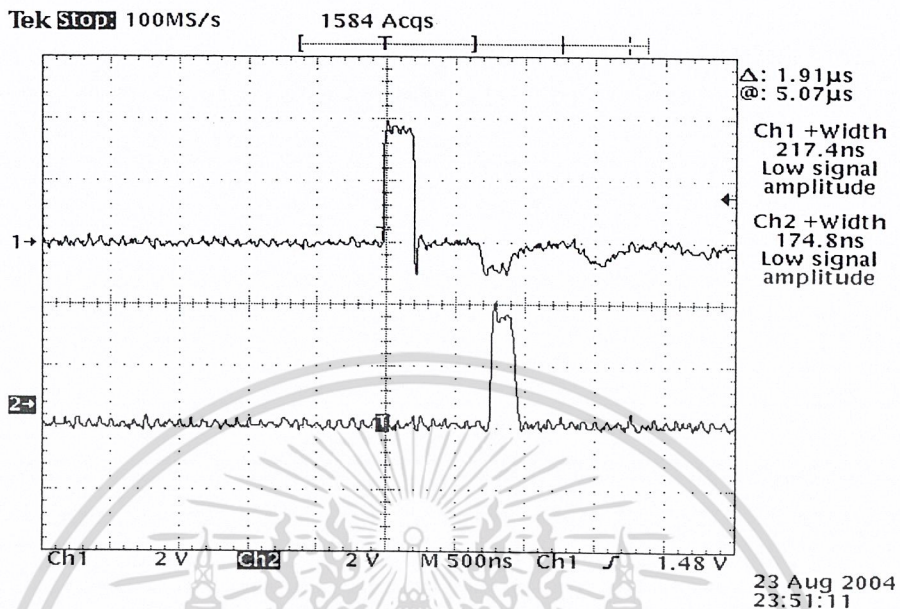
วงจรจะทำหน้าที่เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตกับแรงดันที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่าน้อยกว่า วงจรนี้จะให้เอาต์พุตที่มีค่า 5 V โดยเราได้ใช้วงจรลักษณะเดียวกับวงจรตรวจจับพัลส์บวก เพียงแต่เปลี่ยน ขาของอินพุตและขาของแรงดันเปรียบเทียบเท่านั้น ซึ่งจะได้วงจร ดังรูป



รูปที่ 4.13 วงจรตรวจจับพัลส์ลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

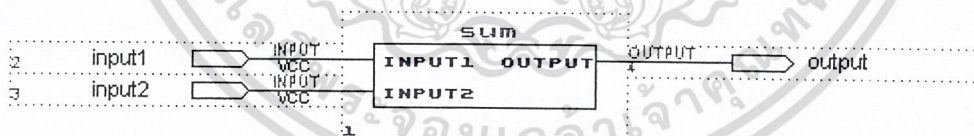
เมื่อเราทำการปรับแต่งและทำการทดลอง โดยการส่งสัญญาณเข้าไปในสาย และทำการลัดวงจรปลายสาย จะได้ผลการทดลอง ดังรูป



รูปที่ 4.14 สัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจจับพัลส์ลบ เปรียบเทียบสัญญาณอินพุต

4.1.6 วงจรรวมสัญญาณ

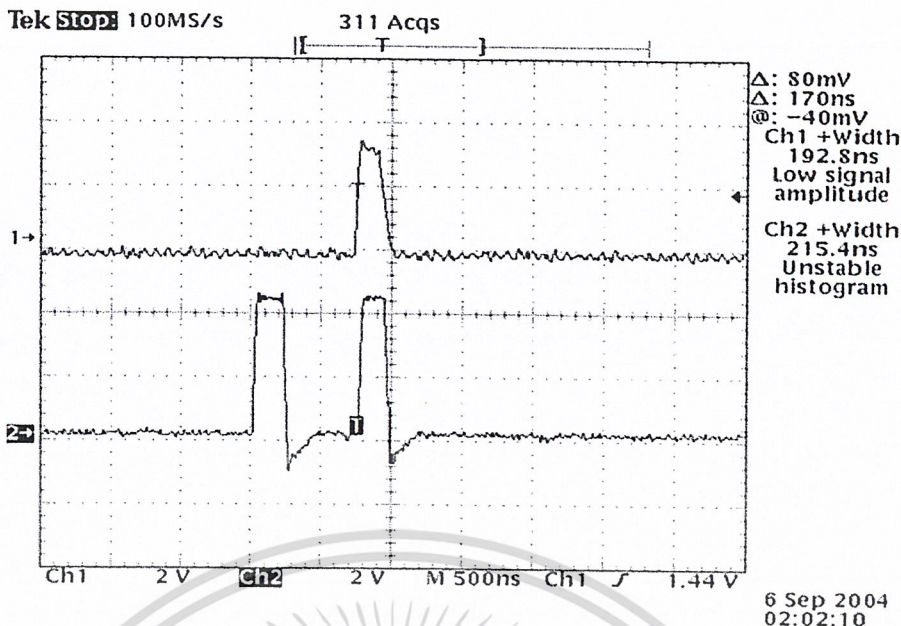
ในส่วนนี้จะทำหน้าที่การรวมสัญญาณและแปลงสัญญาณพัลส์โดยที่วงจรรวมสัญญาณ จะใช้ IC #74HC32 ซึ่งมีโครงสร้างภายในเป็น OR – Gate ตัวทำงาน ซึ่งจะมิงจร ดังรูป



รูปที่ 4.15 วงจรรวมสัญญาณ

เมื่อจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจร โดยให้รวมสัญญาณจากวงจรตรวจจับพัลส์บวกและ วงจรจับพัลส์ลบเข้าด้วยกัน จะได้ผลการทดลอง ดังรูป

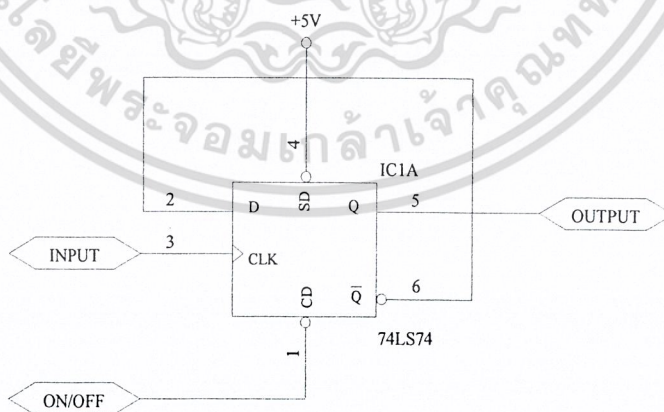
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณที่ได้จากวงจรรวมสัญญาณ

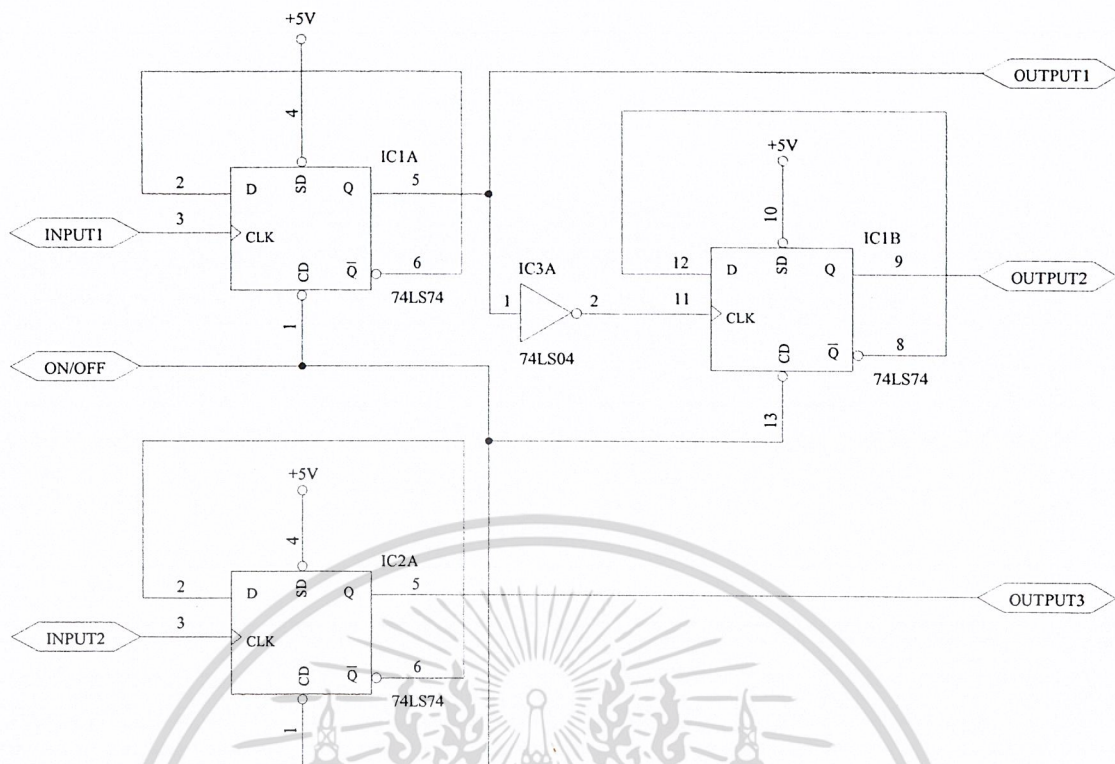
4.1.7 วงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ

วงจรนี้จะเป็นวงจรตรวจจับเวลาที่คลื่นใช้เดินทางไปและกลับในวงจรนี้จะทำการแปลง D – Flip Flop เบอร์ #74HC74 ให้ทำหน้าที่ T – Flip Flop โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ชุด โดย T – Flip Flop 1 จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณพัลส์ หลังจากวงจรตรวจจับสัญญาณ ให้กลายเป็นสัญญาณพัลส์ลูกเดียวเพื่อที่จะส่งไปวงจรคูณสัญญาณต่อไป ส่วน T – Flip Flop 2 จะทำหน้าที่ในกรณีเมื่อสายนั้นเสีย ส่วน T – Flip Flop 3 จะทำหน้าที่เป็นการเสียในกรณีลัดวงจร ปลายสายเท่านั้น



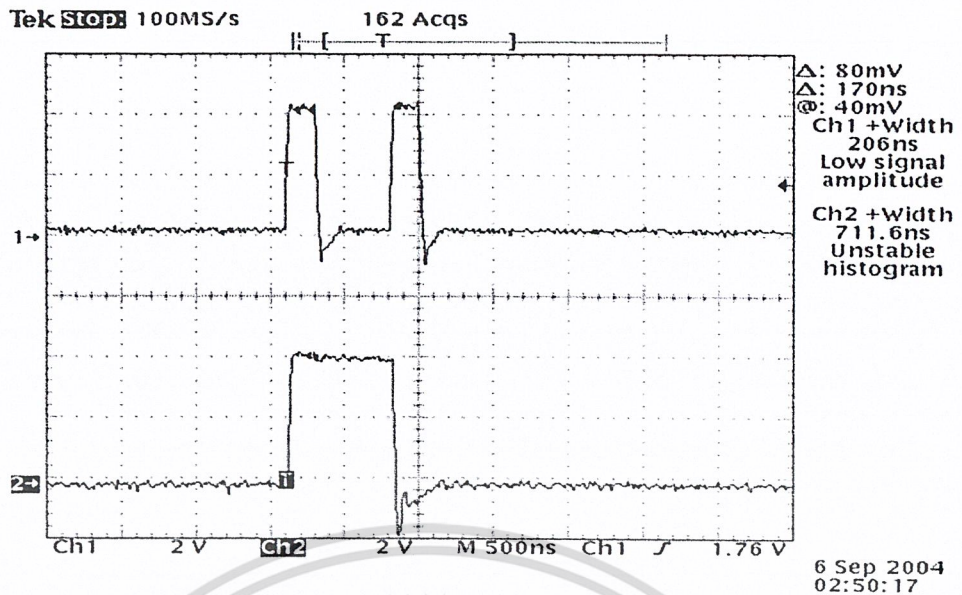
รูปที่ 4.17 วงจรของ D – Flip Flop ที่ทำการแปลงเป็น T – Flip Flop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 วงจรทั้งหมดของวงจรตรวจจับเวลาและวงจรตรวจสอบสถานะ

T – Flip Flop 1 จะรับเอาต์พุตจากภาครวมสัญญาณ โดยตรง เพื่อทำการแปลงสัญญาณพัลส์ ดังนั้นไม่ว่าจะทำการลัดวงจรหรือเปิดปลายสายทดสอบจะมีสัญญาณพัลส์สองลูกวิ่งผ่านมายัง T – Flip Flop 1 เสมอ กล่าวคือ พัลส์ลูกแรกจะเป็นพัลส์ขาส่ง และพัลส์ลูกที่สองจะเป็นพัลส์ที่สะท้อนกลับมาจากสายส่ง ซึ่งอาจเกิดจากกรณี Short หรือ Open ก็ได้ แต่มันได้ถูกแปลงเป็นพัลส์บวกเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจะมีพัลส์สองลูกวิ่งเข้ามาอินพุตของ T – Flip Flop และได้เอาต์พุตเป็นพัลส์หนึ่งลูกที่มีความกว้างเท่ากับระยะห่างของพัลส์อินพุตทั้งสองลูก

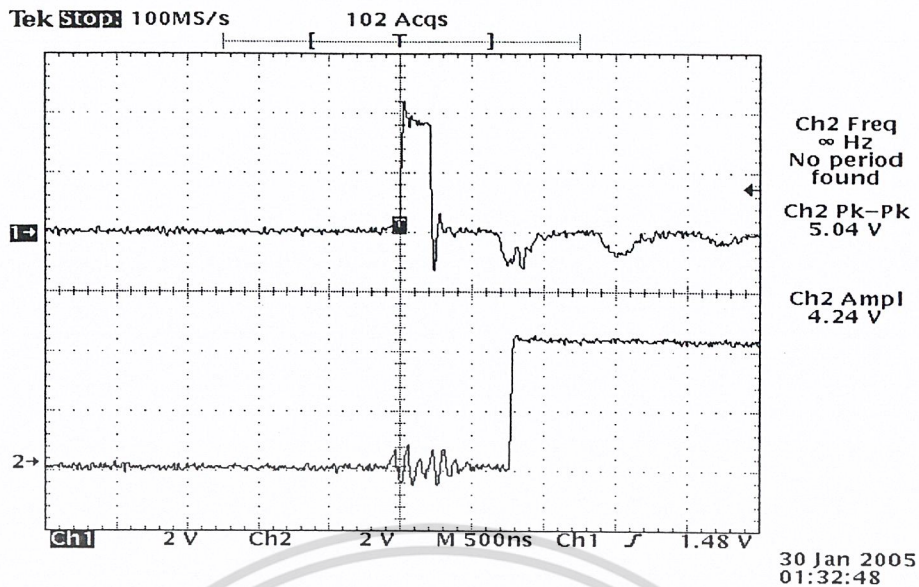


รูปที่ 4.19 สัญญาณที่ได้จากวงจร T-Flip Flop 1 หรือวงจรตรวจจับเวลา

T-Flip Flop 2 จะรับเอาต์พุตจาก T-Flip Flop 1 มาอีกทีหนึ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจว่าสายชำระหรือดี โดยถ้ามีพัลส์จากวงจรรวมสัญญาณเพียงลูกเดียว T-Flip Flop 1 จะเป็นลอจิก “1” ไปตลอดจนกระทั่ง off T-Flip Flop แต่ถ้ามีสัญญาณจากวงจรรวมสัญญาณ 2 ลูก จะทำให้ได้สัญญาณที่ T-Flip Flop 1 มีขอบขาหลง โดย T-Flip Flop 2 นี้จะต้องนำสัญญาณเอาต์พุตของ T-Flip Flop 1 มา กลับรูปร่างสัญญาณเสียก่อน เพราะว่าเมื่อมีขอบขาหลงของวงจร T-Flip Flop 1 จะทำให้เอาต์พุตที่วงจร T-Flip Flop 2 เปลี่ยนสถานะจาก “0” เป็น “1” ทำให้เราตรวจสอบได้ว่า สายดีหรือเสียนั่นเอง

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีพัลส์ลูกที่ 2 ของวงจรรวมสัญญาณมา เอาต์พุตที่ T-Flip Flop 2 จะเป็น “1” ทันที ซึ่งแสดงได้ว่าสายเสียนั่นเอง โดยเราจะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาทำการตรวจสอบเพื่อที่จะประมวลผลต่อไป

ส่วน T-Flip Flop 3 จะรับอินพุตมาจากส่วนตรวจจับพัลส์ลบโดยตรง เพราะฉะนั้น T-Flip Flop 2 จะทำงานเมื่อมีการลัดวงจรปลายสายทดสอบเท่านั้น

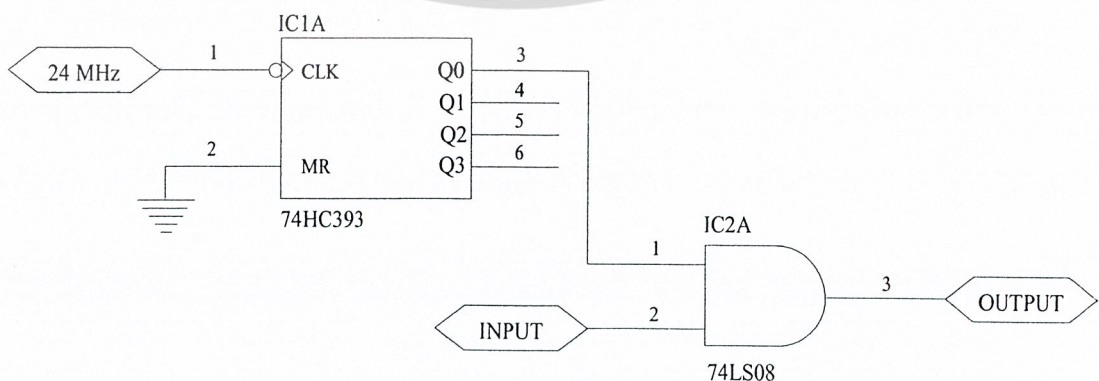


รูปที่ 4.20 สัญญาณที่ได้จากวงจร T-Flip Flop 3 หรือวงจรตรวจสอบเปิดหรือลัดวงจร

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อมีสัญญาณพัลส์ลบเข้ามา T-Flip Flop 3 จะทำงานและให้เอาต์พุตเป็นลอจิก “1” ซึ่งเราจะต้องไปทำการตรวจสอบอีกทีหนึ่ง โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวประมวลผล

4.1.8 วงจรคูณสัญญาณ

เนื่องจากการทำงานของวงจรมีลักษณะเป็นการรับอินพุตเป็นพัลส์ที่มีความกว้างค่าหนึ่ง(ความกว้างเท่ากับระยะห่างของพัลส์ขาส่งและพัลส์สะท้อนกลับ) มากุณกับพัลส์ที่มีความถี่สูงกว่า และได้เอาต์พุตเป็นลักษณะพัลส์อินพุตที่ถูกแบ่งเป็นลูกเล็ก ๆ เพื่อทำการป้อนให้กับวงจรนับต่อไป ในส่วนนี้เราจะใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ ซึ่งเป็น AND-Gate มาเป็นตัวคูณสัญญาณจากวงจรผลิตสัญญาณความถี่ 12 MHz ซึ่งเราได้ใช้ ออสซิลเลเตอร์ 24 MHz มาเข้าสู่วงจรหารความถี่ ซึ่งส่วนนี้ก็ได้ใช้ภาษา VHDL ในการออกแบบ โดยเราป้อนอินพุตและใช้เอาต์พุตที่บิต 1 จะ ได้ความถี่ 12 MHz ตามที่เราต้องการ วงจรเป็นดังรูป

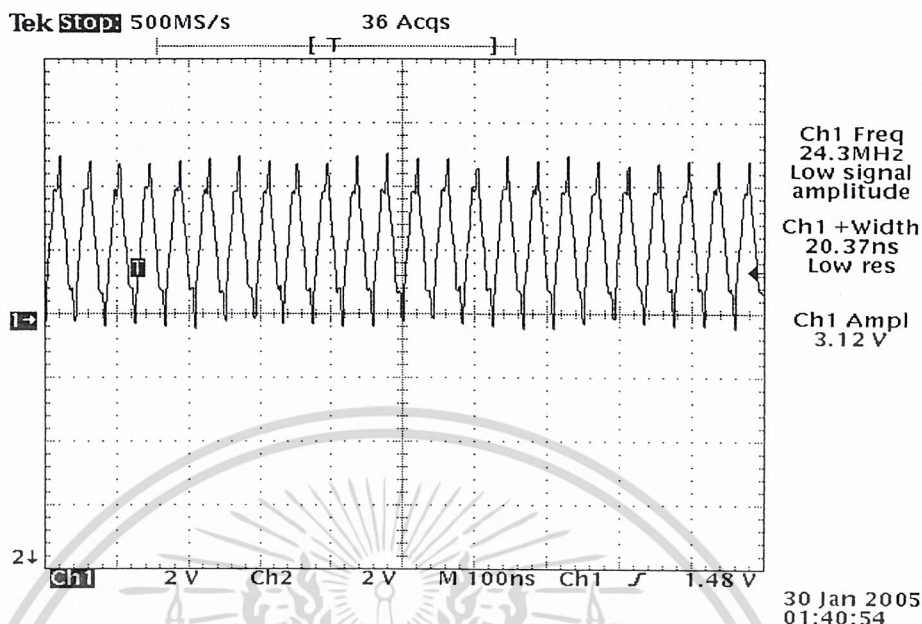


รูปที่ 4.21 วงจรคูณสัญญาณ และวงจรผลิตสัญญาณความถี่ 12 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของ Oscillator ที่ผลิตสัญญาณ 24 MHz นั้น สามารถผลิตสัญญาณออกมาได้

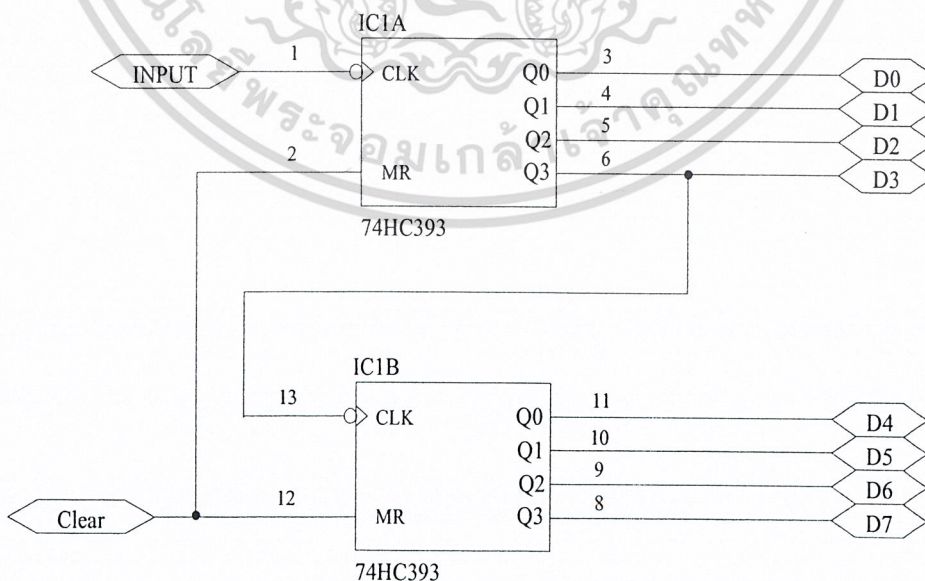
ดังรูป



รูปที่ 4.22 สัญญาณจากออสซิลเลเตอร์ความถี่ 24 MHz

4.1.9 วงจรนับ

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่นับพัลส์ลูกเล็กๆ ที่เกิดจากวงจรคูณ และจะนำค่าไปประมวลผล และเนื่องจากการนับจะต้องนับเฉพาะในช่วงที่มีพัลส์อินพุต “1” เกิดขึ้นและจะนับในช่วงขอบขาขึ้นของพัลส์และ ขอบขาลงของพัลส์เท่านั้น และเราใช้สัญญาณเคลียร์จากวงจรผลิตสัญญาณนาฬิกา 2 kHz เป็นตัวควบคุมการเคลียร์ ในส่วนนี้เราจะใช้ภาษาVHDL ในการออกแบบ เป็นตัวนับสัญญาณซึ่งจะได้วงจร ดังรูป



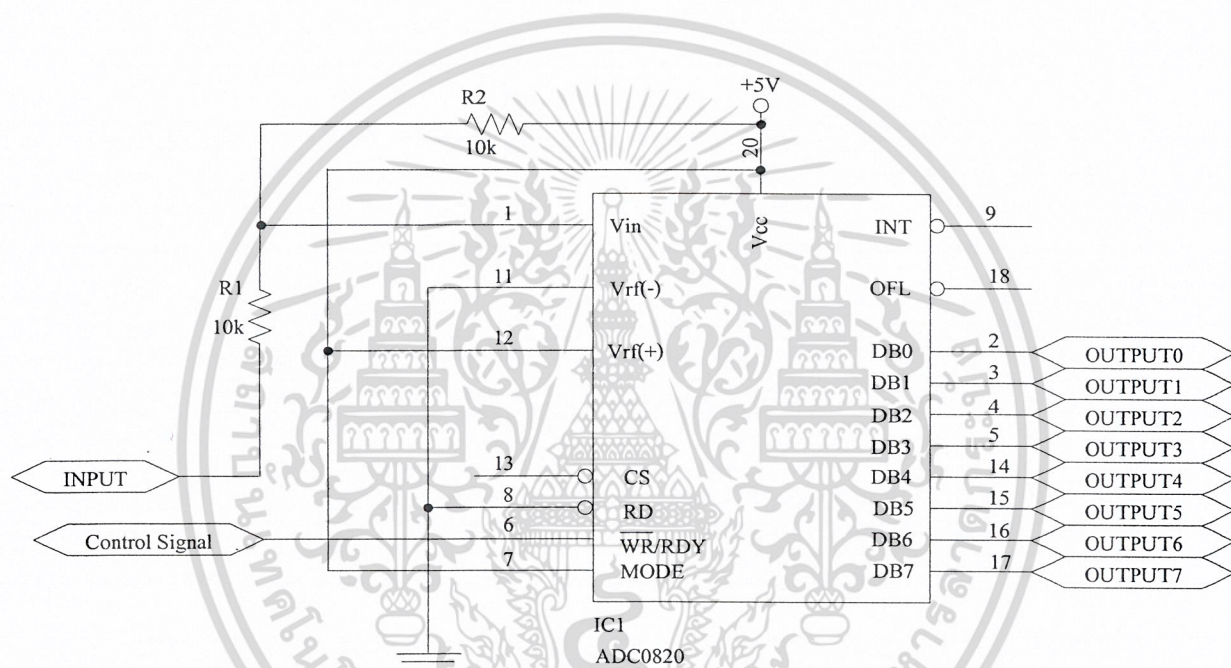
รูปที่ 4.23 วงจรนับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

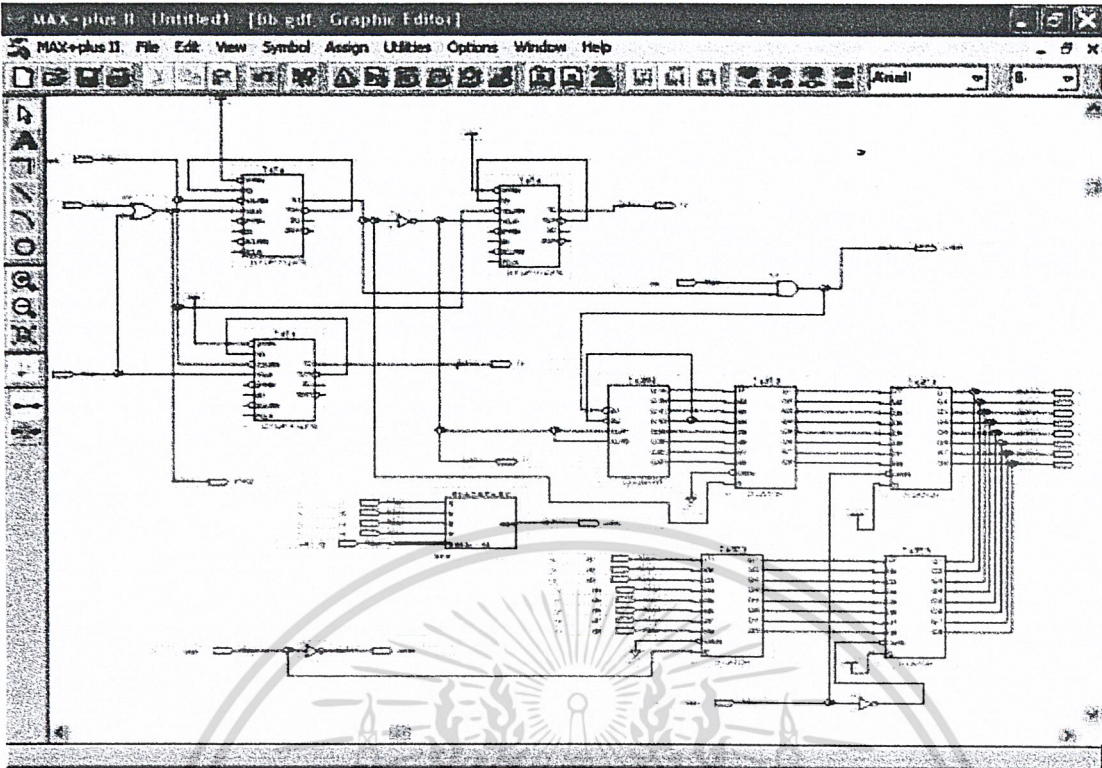
ในส่วนนี้ค่าที่วงจรมับ นับได้จะถูกส่งต่อไปยังส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลต่อไป เพราะฉะนั้น เอาต์พุตของวงจรมับจึงมีความสำคัญมาก และจะต้องกำหนดเวลาในการเริ่มรับข้อมูล และเวลาในการเคลียร์ข้อมูลให้สัมพันธ์กัน ไม่เช่นนั้นจะเกิดความผิดพลาดมา

4.1.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

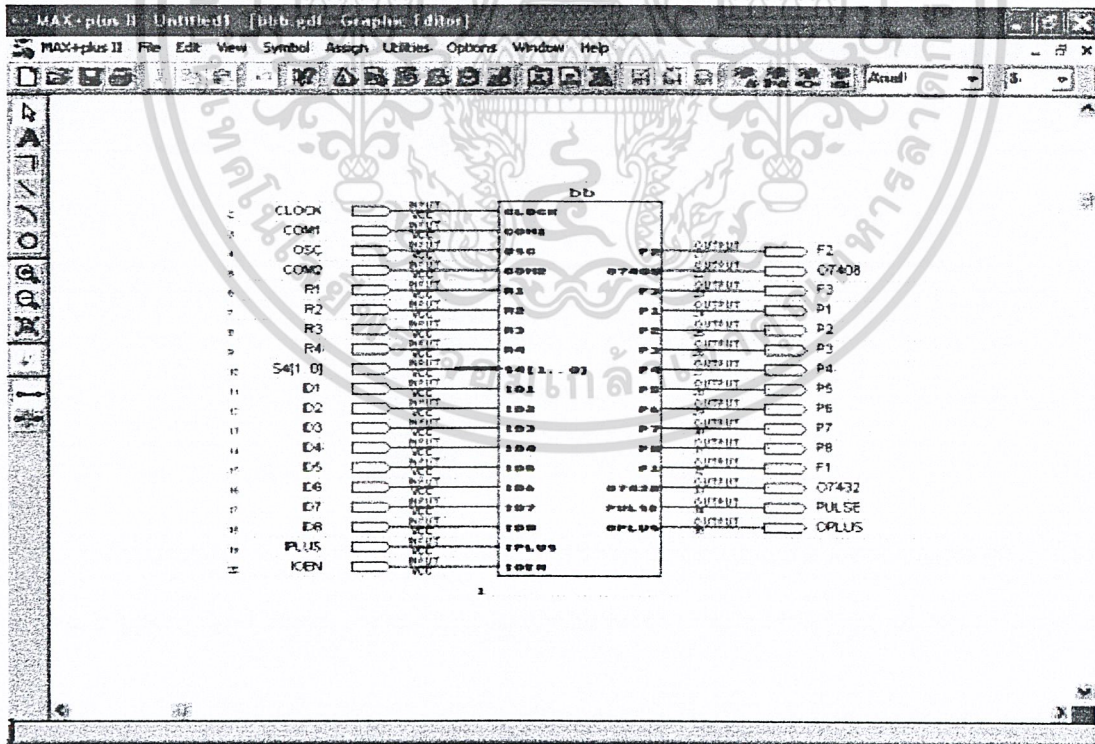
ในส่วนของวงจรมับ เราได้ใช้ IC เบอร์ ADC 0820 ซึ่งให้เอาต์พุต ขนาด 8 บิต และสามารถควบคุมจังหวะการอ่านได้จากส่วนของ วงจรตรวจจับเวลาได้เลย ซึ่งจะใช้ขอบขาขึ้นในการอ่านค่า ซึ่งเอาต์พุตของวงจรมับจะส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะประมวลผลคำนวณหาค่า VSWR และ Reflection Coefficient และแสดงผลไปยัง จอแสดงผลต่อไป ซึ่งมีวงจร ดังรูป



รูปที่ 4.24 วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล



รูปที่ 4.25 วงจรที่เป็นดิจิทัลที่ออกแบบในโปรแกรม MAX+ PLUS



รูปที่ 4.26 ชิปที่รวมวงจรต่างๆ ที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม MAX+ PLUS II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ในโครงงานนี้มีหน้าที่หลัก ๆ อยู่ 6 ประการ คือ

1. ตรวจสอบสัญญาณจาก สวิตช์ เพื่อเริ่มทำงาน
2. ตรวจสอบสัญญาณความพร้อมในการเริ่มรับค่าเพื่อนำมาประมวลผลหรือเปลี่ยน Range
3. ตรวจสอบว่าสายที่นำมาต่อขำรูดหรือไม่
4. ตรวจสอบชนิดของความเสียหายที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบลัดวงจรหรือขาด
5. คำนวณหาระยะทางจากจุดที่ทำการวัด ไปถึงจุดที่ขำรูดว่ามีระยะเท่าไรจากวงจรนับ
6. คำนวณหาค่าแรงดันที่สะท้อนกลับมาเพื่อนำมาคำนวณหาค่า VSWR และ Reflection

Coefficient จากวงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล

ซึ่งจากหน้าที่ทั้งหมดนี้เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. ส่วนของฮาร์ดแวร์
2. ส่วนของซอฟต์แวร์

4.1.11.1 ส่วนของฮาร์ดแวร์ ในส่วนของฮาร์ดแวร์เราได้ทำการต่ออุปกรณ์กับพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนี้

พอร์ต 0 ต่อเข้ากับวงจรนับ

พอร์ต 1 ต่อเข้ากับวงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล

พอร์ต 2 ต่อเข้ากับ LCD

พอร์ต 3.0 ต่อเข้ากับขาสัญญาณเช็คสายขำรูดหรือไม่ขำรูด

พอร์ต 3.1 ต่อเข้ากับขาสัญญาณสายลัดวงจรหรือขาด

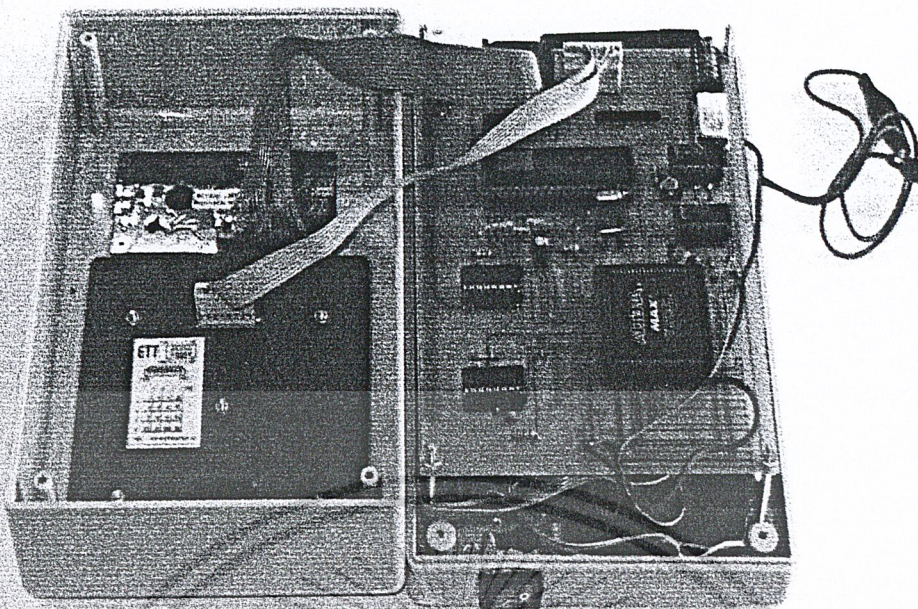
พอร์ต 3.2 ต่อเข้ากับขาสัญญาณแสดงความพร้อมในการรับค่า

พอร์ต 3.3 ต่อเข้ากับสัญญาณเลือก Range บิตที่ 1

พอร์ต 3.4 ต่อเข้ากับสัญญาณเลือก Range บิตที่ 0

พอร์ต 3.5 ต่อเข้ากับสวิตช์ Test

อุปกรณ์ทั้งหมดที่ต่อเข้ากับ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์อีกทีหนึ่ง

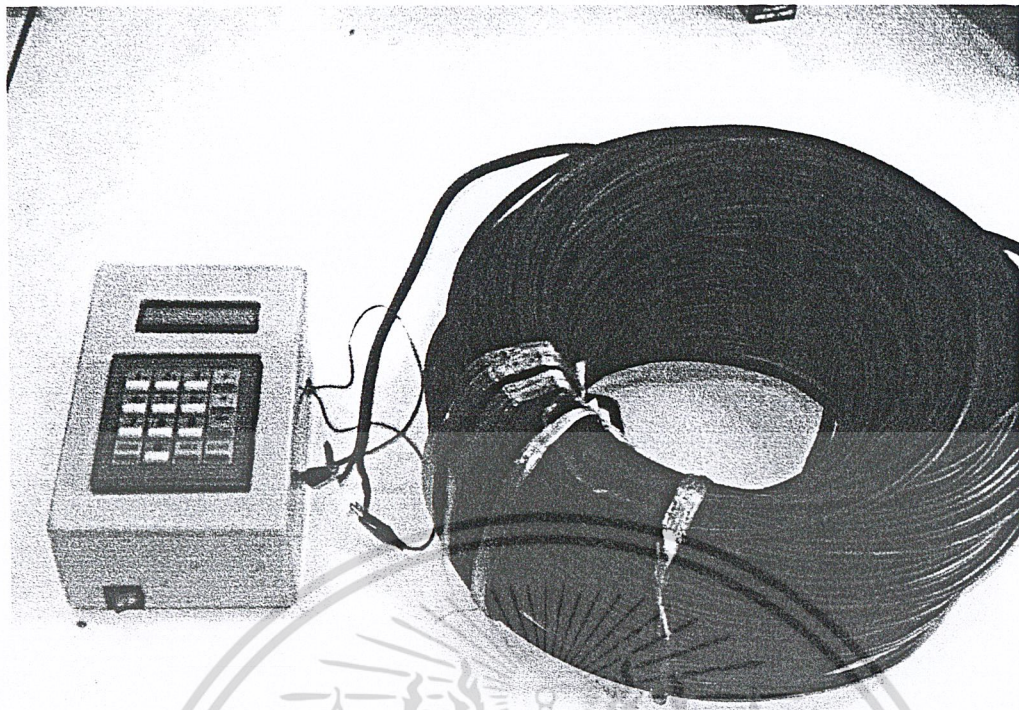


รูปที่ 4.27 แสดงวงจรภายในของเครื่อง



รูปที่ 4.28 ลักษณะภายนอกของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

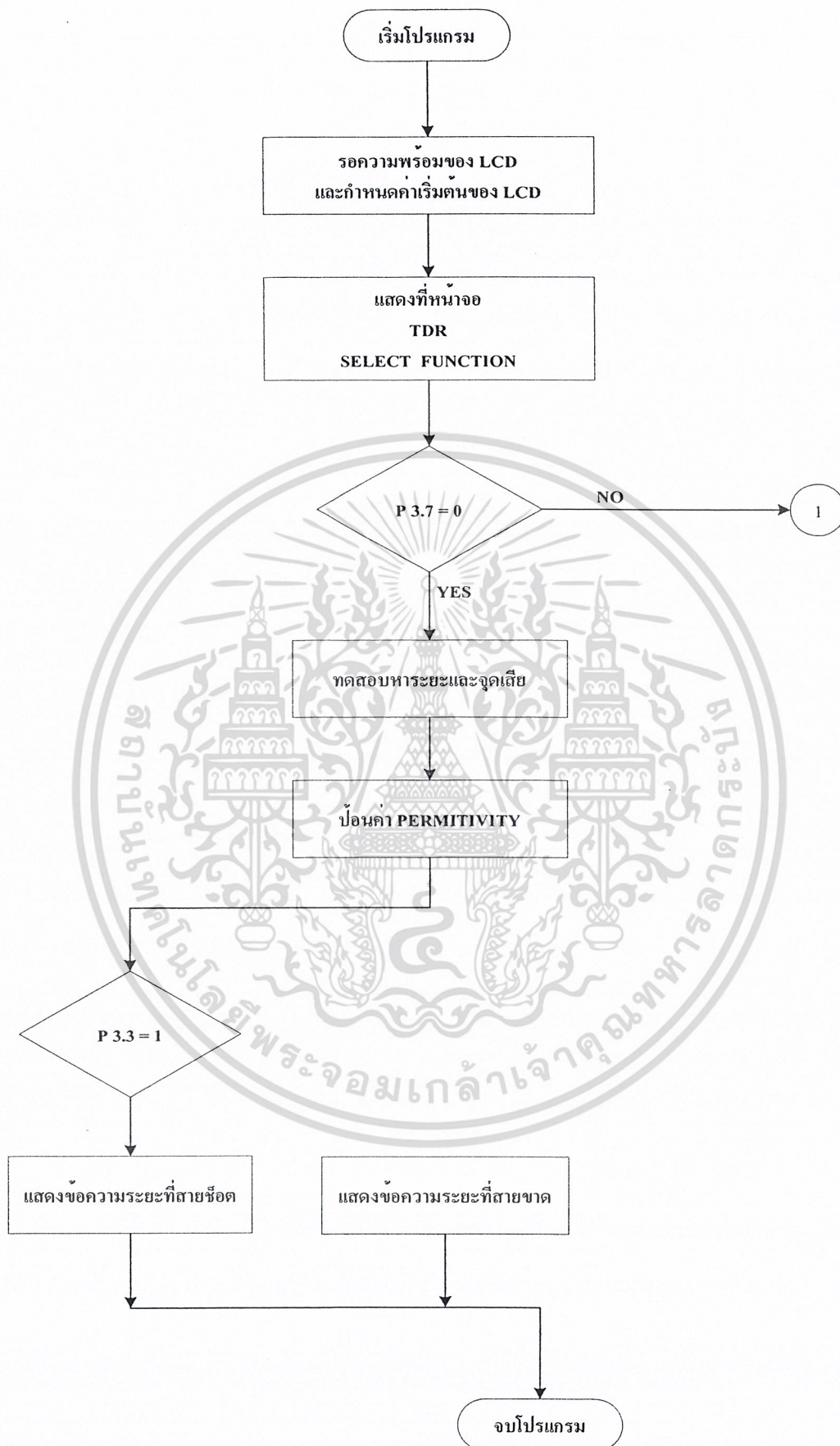


รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะการใช้งานของเครื่อง

4.1.11.2 ส่วนของซอฟต์แวร์ ในส่วนนี้เราได้เขียนโปรแกรมควบคุมฮาร์ดแวร์โดยใช้ภาษาแอสเซมบลีในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงาน

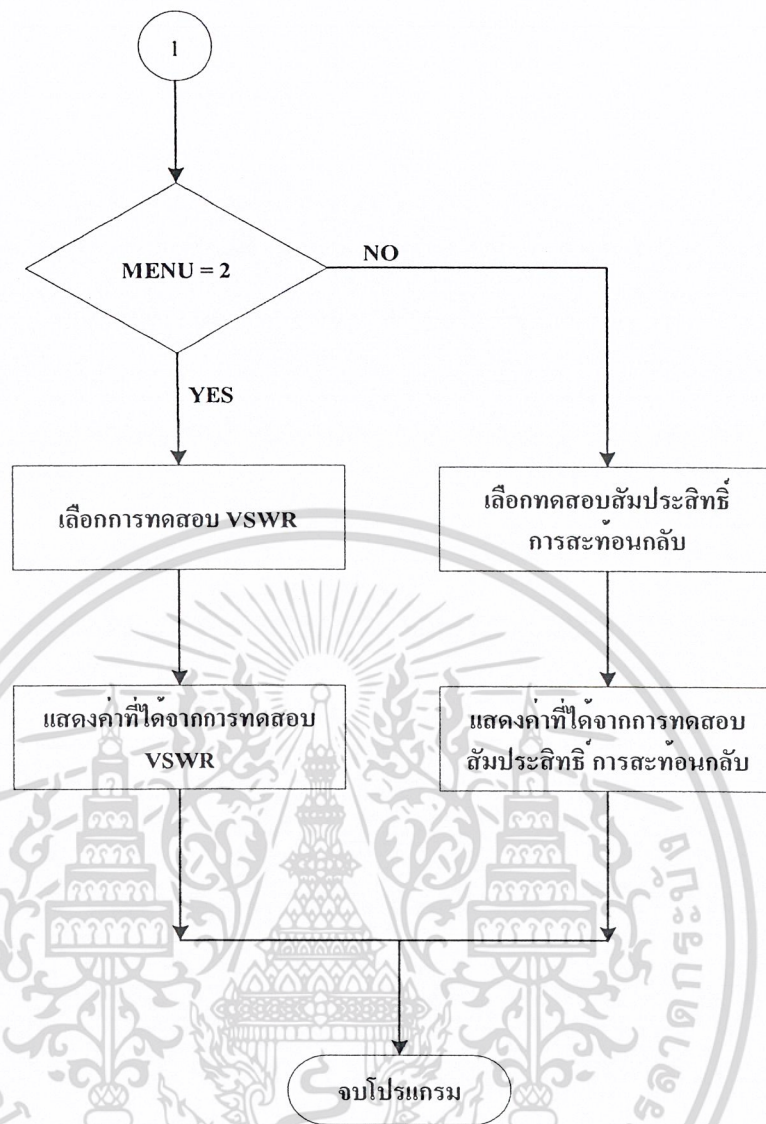
ในส่วนของโปรแกรมนี้อาจเริ่มต้นด้วยการ กำหนดค่าต่าง ๆ ให้ LCD แล้วทำการ โข้ว หน้าจอว่า “PRESS TEST BUTTON” จากนั้นจึงรอสัญญาณจากสวิตช์เพื่อทำการเริ่มรับค่าและคำนวณ เมื่อทำการกดสวิตช์ จะเป็นสัญญาณลอจิก “0” และจะทำการกำหนดค่าที่จะส่งไปยังวงจร Selector ให้เป็น “01” แล้วจึงทำการส่ง จากนั้นจะทำการรอรับสัญญาณพร้อมที่จะรับค่า ที่พอร์ต 3.2 เมื่อที่พอร์ตนี้เป็น ลอจิก “0” โปรแกรมจะทำการเช็คค่าที่พอร์ต 3.0 ถ้าเป็นลอจิก “0” จะทำการเช็คค่าที่ส่งไปยัง Selector ว่า เท่ากับ 3 หรือยัง แล้วให้แสดงว่า “TRANSMISSION LINE GOOD” แล้วกลับไปรอรับค่าจากสวิตช์ เช่นเดิมเพื่อทำการวัดครั้งใหม่ต่อไป ถ้าตอนอ่านค่าที่พอร์ต 3.0 เป็นลอจิก “1” แสดงว่าสายชำรุด โปรแกรมจะทำการไปอ่านค่าที่วงจรนับเพื่อที่จะนำมาประมวลผลต่อไป แล้วจำไปทำการเช็คค่าที่พอร์ต 3.1 ซึ่งเป็นการเช็คสัญญาณว่าสายลัดวงจรหรือขาด หลังจากเช็คแล้วจะไปทำการรับค่าที่วงจรแปลง อนาคตออกเป็นดิจิทัล เพื่อที่จะนำมาประมวลผล หาค่า VSWR และ Reflection Coefficient แล้วจึงแสดงผล หลงจากแสดงผล ก็จะทำการรอรับสัญญาณจากสวิตช์ เพื่อทำการเริ่มทดสอบสายใหม่ หรือถ้าไม่ทดสอบก็ จบโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30(ก) โฟลว์ชาร์ท การทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30(ข) โฟลว์ชาร์ท การทำงานของโปรแกรม(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.12 จอแสดงผล

ในด้านของการแสดงผลนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงออกทางจอแสดงผล (LCD) ที่ต่อกับพอร์ต 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีการควบคุมจาก Key pcd ทางพอร์ต 2 อีกที่หนึ่ง แสดงผลดังนี้

1. เมื่อเริ่มการทำงานจอแสดงผลจะปรากฏข้อความดังนี้

TDR
SELECT FUNCTION

รูปที่ 4.31 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อเริ่มทำงาน

2. เมื่อทำการกดปุ่ม FUNCTION หน้าจอจะเปลี่ยนเป็นข้อความดังนี้

TEST LINE
SELECT ENTER

รูปที่ 4.32 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อสำหรับเลือกทดสอบสายหาระยะจุดเสี่ย

TEST VSWR
SELECT ENTER

รูปที่ 4.33 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลสำหรับเลือกทดสอบแต่ VSWR

TEST REFLECTION
SELECT ENTER

รูปที่ 4.34 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อสำหรับเลือกทดสอบสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

3. เมื่อเลือกทดสอบสายหาระยะจุดเสี่ย จะปรากฏข้อความดังนี้

PUT PERMITIVITY
0000.00

รูปที่ 4.35 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อปรับค่าไดอิเล็กทริก

- 3.1 เมื่อป้อนค่าไดอิเล็กทริกเสร็จจะปรากฏข้อความ

LINE SHORT (M)
261.17

รูปที่ 4.36 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อสายเคเบิลที่ทดสอบลัดวงจร

LINE OPEN (M)
261.17

รูปที่ 4.37 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเมื่อสายเคเบิลที่ทดสอบขาด

4. เมื่อเลือกทดสอบหาค่า VSWR จะปรากฏข้อความดังนี้

TEST LINE VSWR
0003.33

รูปที่ 4.38 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อแสดงค่า VSWR ที่วัดได้

5. เมื่อเลือกทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ

TEST LINE REFLEC
0000.57

รูปที่ 4.39 ข้อความที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลเพื่อแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่วัดได้

6. เมื่อเลือกปุ่ม HELP จะมี MENU ให้เลือกค่า PERMITIVITY ดังนี้

6.1

ALUMINIUM FOIL

10.8

6.2

ALUMINIUM HYDROXIDE

2.5

6.3

ARGON

1.5

6.4

CERAMIC COMPOUND

17

6.5

FERROSILICON

10

6.6

FIBER GLASS POWDER

1.1

6.7

GERMANIUM TETRACHLORIDE

2.4

6.8

IRON(III) OXIDE RED

1.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.9

POLYETHYLENE

1.2

6.10

PVC POWDER. PURE

1.3

6.11

SILICONE RUBBER

2.9

4.2 ผลการทดลองและค่าความผิดพลาด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองจากเครื่องวัด

ระยะความยาวสาย (m)	ระยะความยาวสายและค่า VSWR และ Reflection Coefficient ที่วัดได้จากเครื่องวัด							
	OPEN				SHORT			
	ค่าที่วัด ได้	ค่าความ ผิดพลาด (%)	VSWR	ρ	ค่าที่วัด ได้	ค่าความ ผิดพลาด (%)	VSWR	ρ
78	80.47	3.2	3.57	0.56	80.47	3.2	2.82	-0.47
140	140.83	0.6	3.49	0.55	140.83	0.6	2.79	-0.47
200	201.19	0.6	3.37	0.54	201.19	0.6	2.79	-0.43
218	221.31	1.5	3.41	0.54	221.31	1.5	2.82	-0.45
260	261.55	0.6	3.33	0.53	261.55	0.6	3.03	-0.50
270	271.61	0.5	3.33	0.53	271.61	0.5	3.03	-0.50
278	291.73	4.9	3.33	0.53	291.73	4.9	3.03	-0.53
348	352.09	1.2	3.26	0.52	352.09	1.2	2.96	-0.50
410	422.50	3.0	3.23	0.52	422.50	3.0	2.96	-0.57
470	490.92	4.2	3.19	0.54	490.92	4.2	3.03	-0.50
530	550.28	3.8	3.19	0.52	550.28	3.8	3.03	-0.52
610	623.94	2.3	1.11	0.51	623.94	2.3	3.03	-0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิจารณ์และสรุป

ในการวิเคราะห์นี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในแต่ละภาค โดยจะแสดงปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหาของวงจรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น

1. วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์
2. วงจรเลือกสัญญาณ
3. วงจรขับสัญญาณ
4. วงจรตรวจจับสัญญาณ
5. วงจรรวมสัญญาณ
6. วงจรตรวจจับเวลาและตรวจสอบสถานะ
7. วงจรคูณสัญญาณ
8. วงจรนับ
9. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล
10. ไมโครคอนโทรลเลอร์

5.1 วงจรแปลงแรงดัน

5.1.1 วงจรแปลงแรงดัน 5 V

ในส่วนของวงจรแปลงแรงดันนี้ เราได้ใช้ ICL7805 ในการแปลงแรงดันให้เหลือเพียง 5V ซึ่งใช้ป้อนให้วงจรเพื่อให้งจรทำงาน จากการศึกษาในส่วนของวงจรมันตัว ICL7805 ให้เอาต์พุตตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงไม่พบปัญหาใดๆ

5.1.2 วงจรแปลงแรงดัน +12 V, -12 V, ground

ในส่วนของวงจรแปลงแรงดันนี้ เราได้ใช้ ICL76605 ในการแปลงแรงดันจากไฟบวกเป็นไฟลบ ซึ่งใช้ป้อนให้กับวงจรตรวจจับสัญญาณ เป็นผลให้วงจรสามารถใช้งานได้ตามต้องการ

5.2 วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์

ในส่วนของวงจรมันพัลส์นี้เป็นส่วนหลักของเครื่องมือนี้ โดยในการสร้างเราใช้ IC #74HC123 มาเป็นตัวกำเนิดพัลส์ ซึ่งเราแบ่งย่านการวัดออกเป็น 3 ย่าน โดยยึดเอาค่าตามความเหมาะสมเป็นหลัก และเราก็ได้ทำการสร้างวงจรเพื่อผลิตสัญญาณพัลส์ให้ได้ออกมาตามที่เรากำหนดไว้ โดยต้องมีการปรับแต่งวงจรบ้างเพราะในทางปฏิบัติแล้วค่าที่คำนวณกับค่าที่ออกมาได้จริงนั้นมักจะ ไม่ตรงตามที่ต้องการ ส่วนพัลส์ที่ออกมาจนถึงแม้ว่าจะมีขอบขาลงจะเกิดการสวิง แต่ก็ไม่ค่อยมีผลต่อค่าความผิดพลาดเท่าใดนัก เพราะเราสามารถไปปรับแต่งที่วงจรอื่น ซึ่งโดยรวมแล้วในส่วนของวงจรมันพัลส์นี้ไม่มีปัญหาอะไรเป็นไปตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 วงจรเลือกสัญญาณ

ในส่วนของวงจร Selector นี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกระดับความกว้างของพัลส์ โดยทำการควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเราได้ใช้ IC #74150 มาใช้ซึ่งเป็น IC Selector แบบ 4 บิต แต่ในที่นี้เราใช้เพียงแค่เลือกอินพุต 3 ตัวเท่านั้น ซึ่งในส่วนของวงจรมันก็ไม่มีปัญหาอะไรและตัว IC #74150 นี้สามารถเลือกได้ถึง 16 ค่า เพราะฉะนั้นเราจึงสามารถเพิ่มหรือลดย่านการวัดได้ตามที่เราต้องการ

5.4 วงจรขับสัญญาณ

ในส่วนนี้จะมีความยุ่งยากมากในเรื่องของการเลือก Line Driver ซึ่ง Line Driver บางตัวให้ค่าเอาต์พุตมีค่าต่ำทำให้ส่งสัญญาณพัลส์ไปได้ไม่ไกลเท่าไรนัก และไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาได้ โดยในส่วนนี้เราได้เลือกใช้ Line Driver เบอร์ LM6365 และ LH0002 ซึ่งจะให้ค่าเอาต์พุตที่สูงมากและสัญญาณไม่มีการผิดเพี้ยนเมื่อเทียบกับ Line Driver ตัวอื่นที่ทดสอบมา โดยเราสามารถปรับแต่งรูปสัญญาณพัลส์จากวงจรได้ตามที่เราต้องการ ซึ่งยังเป็นปัญหาอยู่จะต้องแก้ไขและปรับปรุงต่อไป ซึ่งในส่วนนี้ของวงจรขับสัญญาณนี้มีความสำคัญค่อนข้างมากต่อโครงการนี้ เพราะถ้าสัญญาณที่ออกมาจากส่วนของวงจรมันไม่ดีพอ จะทำให้วงจรตรวจจับได้ยากและทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้ จึงต้องให้ความสำคัญกับส่วนของวงจรมันค่อนข้างมาก

5.5 วงจรตรวจจับสัญญาณ

ส่วนนี้จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อความถูกต้องของสัญญาณที่ทำการวัด ซึ่งเป็นส่วนของการตรวจจับสัญญาณส่งไปและสัญญาณที่สะท้อนกลับมา จึงมีความผิดพลาดไม่ได้ ซึ่งเราได้ใช้ IC #LM710 ซึ่งเป็น IC Comparator มาใช้ในการตรวจจับสัญญาณ โดยเราต้องทำการปรับค่าแรงดันเปรียบเทียบไว้ เมื่อสัญญาณที่ส่งเข้ามาหรือสะท้อนกลับมามีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่เราตั้งไว้ ก็จะทำให้เอาต์พุตมีค่า 5 V ออกมาซึ่งจะต้องส่งไปวงจรรวมสัญญาณต่อไป ในส่วนของวงจรมันก็มีผลต่อการทดลองค่อนข้างมาก เพราะสัญญาณที่สะท้อนกลับมาไม่ได้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยม แต่เป็นพัลส์ที่มีลักษณะคล้าย ๆ กับสัญญาณซายน์ ซึ่งในส่วนของการตรวจจับนี้ ถ้าเราตั้งการตรวจจับสัญญาณไว้สูงเกินไปก็จะทำให้ตรวจจับได้ช้าหรือตรวจจับไม่ได้เลย ทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้น แต่ถ้าเราตั้งการตรวจจับไว้ต่ำเกินไปก็จะทำให้อาจจะตรวจจับสัญญาณรบกวนได้ ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองนั้นผิดพลาดเพราะฉะนั้นในส่วนนี้ของวงจรมัน เราจะต้องทำการทดสอบหลาย ๆ ครั้ง แล้วปรับให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

5.6 วงจรรวมสัญญาณ

เป็นวงจรรวมสัญญาณ ที่รับสัญญาณจากในส่วนนี้ของวงจรตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเราได้ใช้ IC #74HC32 ซึ่งเป็น OR-Gate 2 อินพุตมาเป็นตัวรวมสัญญาณ เนื่องจากในส่วนนี้ของวงจรมันไม่ต้องมีการปรับแต่งอะไร ก็สามารถใช้งานได้ตามต้องการ

5.7 วงจรตรวจจับเวลาและตรวจสอบสถานะ

เป็นวงจรที่ใช้ในการแปลงสัญญาณพัลส์ที่เข้ามาให้กลายเป็นพัลส์ลูกเดียวเพื่อจะนำไปทำการประมวลผล ซึ่งในที่นี้เราได้ใช้ D-Flip Flop มาทำการแปลงเป็น T-Flip Flop ในส่วนนี้ได้ใช้ภาษาVHDL ในการออกแบบ ซึ่งวงจรพวกนี้ถ้าเราทำการต่อวงจรแบบถูกต้องแล้วและใช้งานอย่างถูกวิธี แต่ก็จะมีปัญหาตรงที่รูปร่างของสัญญาณเอาต์พุตน่าจะเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม แต่ก็ไม่ได้ตามต้องการเท่าใดนัก จึงทำให้ในส่วนของวงจรคูณและวงจรมับไม่เป็นไปตามที่ต้องการเท่าใด ซึ่งในส่วนนี้มีผลต่อความผิดพลาดหลักของการประมวลผลระยะทางของสายค่อนข้างมาก ถ้าสัญญาณที่ออกจากวงจรส่วนนี้เป็นไปตามที่ต้องการ คิดว่าน่าจะไม่มีผลจากความผิดพลาดจากการประมวลผลระยะทางหรือมีน้อย

5.8 วงจรคูณสัญญาณ

เป็นวงจรที่ใช้ในการคูณสัญญาณพัลส์ที่ส่งมาจาก T-Flip Flop กับ Clock ความถี่สูงเพื่อที่จะส่งไปให้วงจรมับทำการนับสัญญาณต่อไป ซึ่งในส่วนนี้เราได้ใช้ภาษาVHDL ในการออกแบบ ซึ่งเป็น AND-Gate เป็นตัวคูณสัญญาณ โดยเราจะเห็นได้ว่าในส่วนของวงจรมับสัญญาณนี้จะไม่มีปัญหาอะไรเลย แต่จะมีปัญหาหลักตรงที่ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่จะนำมาคูณกับสัญญาณจากส่วนตรวจจับเวลา ซึ่งจะได้ค่าตามที่เราร้องการนั้นยากเพราะในโครงการนี้ต้องการทดสอบสายให้ได้ไกลกว่า 1 กิโลเมตร จึงใช้สัญญาณนาฬิกาที่ 12 MHz โดยใช้ฮอสซิลเลเตอร์นำมาหารความถี่ โดยใช้ภาษาVHDL ในการออกแบบ แต่ว่าจะมีการรบกวนได้ง่ายจึงต้องระวังในส่วนนี้ค่าของสัญญาณนาฬิกาจะมีผลต่อผลการทดลองเป็นอย่างมาก เพราะถ้าค่าเพี้ยนไปมากก็จะทำให้การคำนวณหรือการประมวลผลนั้นผิดพลาดมากไปด้วยจึงต้องเน้นและระวังในส่วนนี้มากเป็นพิเศษ

5.9 วงจรมับ

ในส่วนของวงจรเป็นวงจรมับสัญญาณที่ได้จากวงจรมับสัญญาณและจึงทำการส่งไปให้ในส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเราได้ใช้ภาษาVHDL ในการออกแบบ ทำให้ได้เอาต์พุตเป็น 8 บิต ซึ่งจะนำค่าที่ได้นี้ไปประมวลผลอีกทีหนึ่ง ซึ่งในส่วนนี้ไม่มีปัญหาอะไร

5.10 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

ในส่วนนี้จำเป็นจะต้องเลือกเบอร์ IC ที่จะใช้ให้เหมาะสม เพราะวงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลเป็นวงจรที่มีการประมวลผลค่อนข้างช้าจึงจำเป็นต้องเลือกให้ดี เพราะถ้าช้าเกินไปจะประมวลผลสัญญาณที่เราต้องการไม่ได้เลย เราจึงจำเป็นต้องเลือก ที่มีความเร็วสูงและควบคุมได้ง่าย ในส่วนนี้ก็ไม่มีปัญหาอะไร

5.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนนี้ ฮาร์ดแวร์จะไม่มีปัญหาอะไรแต่จะมีปัญหาตรง ซอฟต์แวร์มากกว่าเพราะเราจะต้องปรับแต่งให้ทำงานสัมพันธ์กับส่วนของวงจรที่เราออกแบบให้มากที่สุด เพื่อที่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งในส่วนนี้เราสามารถแก้ไขและทำการทดสอบได้หลายครั้ง เพราะตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถแก้ไขโปรแกรมได้หลายครั้งเพราะเป็นแบบเฟลช และการต่อฮาร์ดแวร์ก็ง่ายค่อนข้างสะดวก

5.12 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองและวัดค่าเอาต์พุตของแต่ละภาครวมทั้งการเก็บข้อมูลของสัญญาณต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

ค่าความผิดพลาดจะไม่ค่อยคงที่ทั้งนี้เนื่องมาจากหลายส่วน คือ ส่วนของวงจรจับสัญญาณ เพราะจะเป็นส่วนที่หาอุปกรณ์ที่เหมาะสมได้ยากมาก เพราะแต่ละตัวจะเหมาะสมกับสายที่ไม่เหมือนกันจึงต้องทดลองกันมากเป็นพิเศษ และต้องปรับแต่งวงจรภาคตรวจจับสัญญาณให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมาก

ส่วนของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งมีผลต่อความผิดพลาดค่อนข้างมาก เพราะถ้าค่ายิ่งมากเท่าใดก็จะทำให้วัดได้ละเอียดมากขึ้นเท่านั้น แต่ว่าถ้าสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ค่อนข้างสูงจะหาวงจรหรือหาอุปกรณ์ได้ยากและจะมีความเพี้ยนของสัญญาณค่อนข้างมาก เราจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมไม่มากหรือน้อยจนเกินไป

จากในส่วนของสัญญาณนาฬิกาเมื่อเรานำมาคูณกับสัญญาณที่เราตรวจจับเวลาได้และผ่านเข้าสู่วงจรนับนั้น ลักษณะของสัญญาณที่ทำการคูณเสร็จแล้วเกิดเพี้ยนไปเล็กน้อยทำให้สัญญาณที่เข้าสู่วงจรนับและวงจรนับทำการนับเกิดนับเพี้ยนไปด้วย ซึ่งจากลักษณะของสัญญาณนาฬิกานั้น ถ้าสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง เมื่อวงจรนับทำการนับพลาดไป 1 ลูก ก็จะผิดพลาดน้อย แต่ถ้าสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ต่ำ เมื่อวงจรนับนับพลาดไป 1 ลูก ก็จะผิดพลาดสูงตามไปด้วย

ซึ่งจากผลการทดลองของโครงการนี้จะเป็นได้ว่า ค่าความผิดพลาดจะไม่ค่อยคงที่ ซึ่งเกิดมาจากวงจรนับนับผิดพลาดนั่นเอง เพราะสัญญาณที่ได้จากวงจรหลาย ๆ วงจรจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นมาบ้าง ทำให้ไม่ได้รูปร่างของสัญญาณตามที่เราต้องการ

ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะมีปัญหาตรงส่วนตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ เพราะในโครงการนี้ทำการวัดเป็นแบบอัตโนมัติ จึงต้องทำการตรวจจับสัญญาณหลายครั้งจึงต้องเขียนโปรแกรมให้สัมพันธ์กับสัญญาณเหล่านี้ด้วย ซึ่งตรงในส่วนนี้เราจึงต้องจำเป็นที่จะต้องศึกษา หรือเข้าใจ Timing ของวงจรต่าง ๆ ด้วยเพื่อที่จะง่ายต่อการเขียนโปรแกรมและออกแบบวงจร

เครื่องนี้สามารถทำการวัดได้ที่ระยะตั้งแต่ 80 เมตรจนถึง 600 เมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดแต่ละระยะได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

5.13 แนวทางการพัฒนา

จากการทำโครงการนี้ทำให้คิดว่ามีแนวทางการพัฒนาต่อได้หลายแบบคือ

1. พยายามหา Line Driver ที่เหมาะสมให้ได้ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสายได้ตามต้องการซึ่งจะทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นน้อยลง
2. ในส่วนของวงจรตรวจจับสัญญาณ หากสามารถหาวงจรที่ตรวจจับสัญญาณได้เร็วและให้เอาต์พุตที่ชัดเจนได้ จะทำให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยลงเช่นกัน
3. ในส่วนของวงจรถ่ายทอดสัญญาณพัลส์ที่จะส่งเข้าไปในสาย จะต้องพยายามหาอุปกรณ์ที่กำเนิดสัญญาณพัลส์ได้แคบมากที่สุดเพื่อที่จะสามารถวัดระยะของสายเคเบิลได้สั้นที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#pragma code
#include <reg52.h>
#include <absacc.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
sbit x0=P1^0;
sbit x1=P1^1;
sbit x2=P1^2;
sbit x3=P1^3;
sbit x4=P1^4;
sbit x5=P1^5;
sbit x6=P1^6;
sbit x7=P1^7;
sbit f3 =P3^3;
sbit s1 =P3^4;
sbit s2 =P3^5;
sbit gate=P3^6;
sbit f1=P3^7;
sbit e =P3^1;
sbit rw =P3^2;
sbit rs =P3^0;
sbit r0 =P2^3;
sbit r1 =P2^2;
sbit r2 =P2^1;
sbit r3 =P2^0;
sbit c3 =P2^4;
sbit c2 =P2^5;
sbit c1 =P2^6;
sbit c0 =P2^7;
typedef unsigned char byte;
unsigned char data lcdbuf[16],buffer[11],logic[7],ex[3];
code unsigned char data7[]={0x30,0x31,0x32,0x33,0x34,0x35,0x36,0x37,0x38,0x39,0x2e};
void dmsec (unsigned int count)
{
    unsigned int i;
    while(count)
    {
        i=155;
        while(i>0)
            i--;
        count--;
    }
}
unsigned long sum_dec ()
{
    unsigned char y0,y1,y2,y3,y4,y5,y6,y7;
    unsigned long ans;
    y0=0;
    y1=0;
    y2=0;
    y3=0;
    y4=0;
    y5=0;
    y6=0;
    y7=0;
    if(x0==1)
    {
        y0=1;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(x1==1)
{
y1=2;
}
if(x2==1)
{
y2=4;
}
if(x3==1)
{
y3=8;
}
if(x4==1)
{
y4=16;
}
if(x5==1)
{
y5=32;
}
if(x6==1)
{
y6=64;
}
if(x7==1)
{
y7=128;
}
ans=y0+y1+y2+y3+y4+y5+y6+y7;
return(ans);
}
void puls_wi()
{
e=0;
rw=0;
rs=0;
e=1;
dmsec(10);
e=0;
}
void puls_wd()
{
rs=1;
rw=0;
e=0;
e=1;
dmsec(10);
e=0;
}
void lcd_int()
{
P0=0x38;
puls_wi();
P0=0x0c;
puls_wi();
P0=0x01;
puls_wi();
P0=0x06;
puls_wi();
}
void lcd_wi(byte x)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    P0=x;
    puls_wi();
    dmsec(10);
}
void lcd_wd(byte y)
{
    P0=y;
    puls_wd();
    dmsec(10);
}
void display(byte x,char *str)
{
    int i,count;
    count=strlen(str);
    lcd_wi(x);
    for(i=0;i<=count;i++)
        lcd_wd(str[i]);
}
unsigned char scankey()
{
    unsigned char ret=0xff;
    c0=0;
    if(r0==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=1;
    }
    if(r1==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=4;
    }
    if(r2==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=7;
    }
    if(r3==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=15;
    }
    c0=1;

    c1=0;
    if(r0==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=2;
    }
    if(r1==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=5;
    }
    if(r2==0)
    {
        dmsec(300);
        ret=8;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(r3==0)
{
    dmsec(300);
    ret=0;
}
c1=1;

c2=0;
if(r0==0)
{
    dmsec(300);
    ret=3;
}
if(r1==0)
{
    dmsec(300);
    ret=6;
}
if(r2==0)
{
    dmsec(300);
    ret=9;
}
if(r3==0)
{
    dmsec(300);
    ret=14;
}
c2=1;
c3=0;
if(r0==0)
{
    dmsec(300);
    ret=10;
}
if(r1==0)
{
    dmsec(300);
    ret=11;
}
if(r2==0)
{
    dmsec(300);
    ret=12;
}
if(r3==0)
{
    dmsec(300);
    ret=13;
}
c3=1;
return(ret);
}
void clear_display()
{
    P0=0x01;
    puls_wi();
}

void clear_lcdbuf()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    unsigned char i;
    for(i=0;i<=8;i++)
        logic[i]=' ';
}
void scan_display()
{
    unsigned char x,i;
    lcd_wi(0xc4);
    for(i=0;i<=6;i++)
    {
        x=data7[logic[i]];
        lcd_wd(x);
    }
}

void show_num(float num)
{
    float buf;
    unsigned long mul,wee;
    mul=num;
    wee=mul;
    logic[0]=mul / 1000;
    mul=mul %1000;
    logic[1]=mul / 100;
    mul=mul%100;
    logic[2]=mul / 10;
    logic[3]=mul % 10;
    logic[4]= 10;
    buf=num-wee;
    mul=buf*100;
    logic[5]=mul/10;
    logic[6]=mul%10;
}
void scan_per()
{
    unsigned char x,i;
    lcd_wi(0xc6);
    for(i=0;i<=4;i++)
    {
        x=data7[ex[i]];
        lcd_wd(x);
    }
}
void show_per(unsigned long num)
{
    unsigned long buf;
    ex[0]=num / 1000;
    buf=num%1000;
    ex[1]=buf/ 100;
    ex[2]=10;
    buf=buf%100;
    ex[3]=buf/ 10;
    ex[4]=buf%10;
}
float sum_per()
{
    float p1,p2,p3,p4,sol;
    p1= ex[0]*10;
    p2=ex[1]*1;
    p3=ex[3]*0.016;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    p4=ex[4]*0.001;
    sol=p1+p2+p3+p4;
    return(sol);
}
unsigned long input_num()
{
    unsigned char x;
    unsigned long num;
    num=0;
    x=0;
    while(x!=13)
    {
        x=scankey();
        if(x<10)
        {
            num=num*10+x;
        }

        if(x==15)
        {
            clear_lcdbuf();
            num=0;
        }
        show_per(num);
        scan_per();
    }
    if(x==13)
    {
        return(num);
    }
}
main()
{
    unsigned char x,m_count,menu,p_count,nu;
    float s, distant,d,u,tp,per,v,t,al;
    lcd_int();
    strncpy(lcdbuf,"      TDR      ",16);
    display(0x80,lcdbuf);
    strncpy(lcdbuf," SELECT FUNCTION",16);
    display(0xc0,lcdbuf);
    dmsec(500);
    m_count=0;
    menu=0;
    p_count=0;
    nu=0;
    v=0.01953125;
    while(1)
    {
        x=scankey();
        if(x==14)
        {
            p_count=p_count+1;
            switch(p_count)
            {
                case 1 :clear_display();
                    strncpy(lcdbuf," ALUMINIUM FOIL",16);
                    display(0x80,lcdbuf);
                    strncpy(lcdbuf,"      10.8      ",16);
                    display(0xc0,lcdbuf);
                    nu=1;
                    break;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

case 2 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      ARGON",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      2.1  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=2;
        break;
case 3 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"CERAMIC
        COMPOUND",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      17  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=3;
        break;
case 4 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      FERROSILICON",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      10  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=4;
        break;
case 5 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"FIBERGLASS
        POWER",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      1.1  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=5;
        break;
case 6 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      GERMANIUM",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      2.4  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=6;
        break;
case 7 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      IRON(III)OXIDE",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      1.9  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=7;
        break;
case 8 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      POLYETHYLENE",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      1.2  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=8;
        break;
case 9 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"      PVC POWER.PURE",16);
        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      1.3  ",16)
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=9;
        break;
case 10 :clear_display();
        strncpy(lcdbuf,"SILICONE
        RUBBER",16);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        display(0x80,lcdbuf);
        strncpy(lcdbuf,"      2.9  ",16);
        display(0xc0,lcdbuf);
        nu=10;
        break;
    }
    if(p_count==10)
        p_count=0;
        dmsec(500);
}
if(x==12)
{
    m_count=m_count+1;
    switch(m_count)
    {
        case 1 :clear_display();
                strncpy(lcdbuf,"  TEST  LINE",16);
                display(0x80,lcdbuf);
                strncpy(lcdbuf," SELECT ENTER  ",16);
                display(0xc0,lcdbuf);
                menu=1;
                break;
        case 2 :clear_display();
                strncpy(lcdbuf,"  TEST  VSWR",16);
                display(0x80,lcdbuf);
                strncpy(lcdbuf," SELECT ENTER  ",16);
                display(0xc0,lcdbuf);
                menu=2;
                break;
        case 3 :clear_display();
                strncpy(lcdbuf,"TEST REFLECTION",16);
                display(0x80,lcdbuf);
                strncpy(lcdbuf," SELECT ENTER  ",16);
                display(0xc0,lcdbuf);
                menu=3;
                break;
    }
    if(m_count==3)
        m_count=0;
        dmsec(500);
}
if(x==13)
{
    clear_display();
    switch(menu)
    {
        case1 :strncpy(lcdbuf," PUT PERMITIVITY",16);
                display(0x80,lcdbuf);
                per=input_num();
                if(f3==1)
                {
                    strncpy(lcdbuf," LINE SHORT (M)",16);
                    display(0x80,lcdbuf);
                    gate=0;
                    s=sum_per();
                    u=sum_dec();
                    tp=u*25;
                    v=tp/sqrt(s);
                    t=v/2;
                    show_num(t);
                    scan_display();
                }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    else strncpy(lcdbuf, " LINE OPEN
(M)", 16);
    display(0x80, lcdbuf);
    gate=0;
    s=sum_per();
    u=sum_dec();
    tp=u*25;
    v=tp/sqrt(s);
    t=v/2;
    show_num(t);
    scan_display();
    break;
case 2 :strncpy(lcdbuf, "TEST LINE  VSWR", 16);
    display(0x80, lcdbuf);
    gate=1;
    dmsec(500);
    s=sum_dec();
    d=s*v;
    distant=d/5;
    a1=(1+distant)/(1-distant);

    show_num(a1);
    scan_display();
    break;
case3 :strncpy(lcdbuf, "REFLECTION COEF", 16);
    display(0x80, lcdbuf);
    gate=1;

    dmsec(500);
    s=sum_dec();
    d=s*v;
    distant=d/5;

    if (f3==1)
    {
    strncpy(lcdbuf, "-", 16);
    display(0xc3, lcdbuf);

    show_num(distant);
    scan_display();
    }
    else show_num(distant);
    scan_display();
    break;
}
}
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. กิตติพัฒน์ ต้นตระกูลรุ่งโรจน์, ดร. ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: วิทยพัฒน์, 2541
2. ถวิล กิ่งทอง. ทฤษฎีโครงข่ายไฟฟ้าและสายส่ง. พิมพ์ครั้งที่ 7. 2538 (ม.ป.ท.)
3. สมยศ จุณณะปิยะ, รศ. การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ครั้งที่ 3. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2543.
4. บริษัท อีทีที, Dot Matrix LCD Module. กรุงเทพฯ.
5. ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตวิไล, วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล. เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51. กรุงเทพมหานคร: อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้