

จอแสดงตำแหน่งรถเมล์อัตโนมัติแบบ Non-Realtime
Automatic Non-Realtime Bus Position Display



โดย

นายเชิดชาย ชราศรี

นายประหยัด พังคะโส

นายอัฐพล ไทยเจริญพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50107

วัน,เดือน,ปี 2 1 เม.ย. 2547

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

11/3/2004

จอแสดงตำแหน่งรถเมล์อัตโนมัติแบบ Non-Realtime
Automatic Non-Realtime Bus Position Display

โดย

นายเชิดชาย	ชราศรี	43015011
นายประหยัด	พังกะโส	43015022
นายอัฐพล	ไทยเจริญพร	43015050

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **ขอแสดงตำแหน่งรถเมล์อัตโนมัติแบบ Non-Realtime**

Automatic Non-Realtime Bus Position Display

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------|------------|----------|
| 1. นายเชิดชาย | ชราศรี | 43015011 |
| 2. นายประหัย | พังกะโส | 43015022 |
| 3. นายอัฐพล | ไทยเจริญพร | 43015050 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ)

จอแสดงตำแหน่งรถเมล์อัตโนมัติแบบ Non-realtime
Automatic Non-Realtime Bus Position Display

โดย นายเชิดชาย	ชราศรี	43015011
นายประหยัด	พังคะโส	43015022
นายอัฐพล	ไทยเจริญพร	43015050

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

สภาพการจราจรในกรุงเทพฯ ปัจจุบันค่อนข้างหนาแน่น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนก่อนการเดินทางซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในขณะนั้นด้วย รถเมล์ก็เป็นยานพาหนะหนึ่งที่คนส่วนมากใช้ในการเดินทาง แต่เนื่องด้วยเราไม่สามารถทราบเวลาของรถเมล์ว่าจะมาถึงป้ายเมื่อไร ในโครงการนี้จึงได้เสนอหลักการและแบบจำลอง ในการที่จะแสดงตำแหน่งของรถเมล์ว่าอยู่ที่ป้ายใดและที่เวลาใด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการเดินทางต่อไป

ABSTRACT

The traffic in Bangkok is high density, it is necessary to plan the route before leaving. Bus is one media for traffic, it is necessary to know when the bus comes to the bus stop. This project presents the principle and model to display the bus position for using is travel information.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 หลักการของเครือข่ายและโปรโตคอลที่ใช้	2
2.2 หลักการทำงานในส่วนการรับและส่งข้อมูล	8
2.3 การรับส่งข้อมูลอนุกรม (UART) และ AT89S8252	27
2.4 DS 1307 ไอซีสร้างฐานเวลาจริง	28
2.5 เทคนิคมอดูเลชันพื้นฐาน	31
2.6 การมอดูเลตสัญญาณอนาล็อก (Analog modulation)	32
2.7 การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล (Digital Modulation)	37
2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter)	43
2.9 เฟสล็อคลูป	47
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1 โครงสร้างของวงจร	52
3.2 การออกแบบทางด้านป้ายรถประจำทาง	53
3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ทางด้านป้ายรถประจำทาง	53
3.2.2 วงจรฐานเวลาจริง (real time clock)	54
3.2.3 วงจรบันทึกข้อมูลของรถประจำทาง	54
3.2.4 วงจรแปลงสัญญาณจาก CMOS เป็น RS-485	54
3.2.5 โพล์ซาร์ตของโปรแกรมทางด้านป้าย	56
3.2.6 โพล์ซาร์ตส่วนแสดงผล	58
3.3 การออกแบบบล็อคมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณ BPSK	58
3.3.1 วงจรแปลงยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์	58
3.3.2 วงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์	59
3.3.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน	59
3.3.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	61
3.3.5 วงจรเฟสล็อคลูป	62
3.3.6 วงจรรวมสัญญาณ	64
3.3.7 วงจรเครื่องรับ-ส่ง	65
3.3.8 วงจรรวมเครื่องส่ง	66
3.3.9 วงจรรวมเครื่องรับ	70

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ หนังสืออ้างอิง	81

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อป้าย	2
รูปที่ 2.2 การติดต่อระหว่างป้ายกับรถประจำทาง	2
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการรับส่งข้อมูลระหว่างป้ายกับรถประจำทาง	3
รูปที่ 2.4 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาณร้องขอ	3
รูปที่ 2.5 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาณตอบรับ	4
รูปที่ 2.6 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาณสิ้นสุดการติดต่อ	4
รูปที่ 2.7 แสดงการเชื่อมต่อสาย RS-232D กับ DCE ของโฮสต์	5
รูปที่ 2.8 Balanced Signaling	5
รูปที่ 2.9 แสดงการติดต่อระหว่างป้าย 1	7
รูปที่ 2.10 แสดงการติดต่อระหว่างป้าย 2	7
รูปที่ 2.11 การจัดเฟรมข้อมูลในการส่งข้อมูล	7
รูปที่ 2.12 การจัดเฟรมข้อมูลในการตอบรับ	8
รูปที่ 2.13 การจัดการข้อมูลก่อนส่ง	8
รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมทางด้านป้ายรถประจำทาง	9
รูปที่ 2.15 สัญญาณข้อมูลเทียบกับสัญญาณนาฬิกา	10
รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมทางด้านรถประจำทาง	11
รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งขาของ AT89C2051	12
รูปที่ 2.18 วงจรพื้นฐานการลงโปรแกรมแบบอนุกรม	13
รูปที่ 2.19 สัญญาณที่ใช้ในการดาวน์โหลดแบบอนุกรม	13
รูปที่ 2.20 รายละเอียดของรีจิสเตอร์แสดงสถานะของโปรแกรมหรือ PSW	16
รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมการทำงานในโหมด 3 ของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1	19
รูปที่ 2.22 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ T2CON	19
รูปที่ 2.23 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ T2MOD	20
รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมการทำงานในโหมดแคปเจอร์ของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2	22
รูปที่ 2.25 ไดอะแกรมการทำงานในโหมดตั้งค่าการนับอัตโนมัติของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2	22
รูปที่ 2.26 ไดอะแกรมการทำงานในโหมดกำเนิดอัตราบอด ในการสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2	23
รูปที่ 2.27 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ WMCON และ WCON	24
รูปที่ 2.28 แสดงตำแหน่งขาของ AT89C2051	26
รูปที่ 2.29 การจัดขาไอซี DS1307	29
รูปที่ 2.30 รูปแบบของข้อมูลสำหรับติดต่อกับ DS1307 ในโหมดการเขียนข้อมูล	31

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.31 รูปแบบของข้อมูลสำหรับติดต่อกับ DS1307 ในโหมดการอ่านข้อมูล	31
รูปที่ 2.32 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเสียงความถี่ 10 kHz	33
รูปที่ 2.33 รูปคลื่น FM ในเชิงความถี่ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3	35
รูปที่ 2.34 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางขนาด	38
รูปที่ 2.35 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางความถี่	38
รูปที่ 2.36 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางเฟส	39
รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตแบบ BPSK	39
รูปที่ 2.38 สถานะ Phase Diagram และ Constellation Diagram ของสัญญาณ BPSK	40
รูปที่ 2.39 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ BPSK	40
รูปที่ 2.40 เปรียบเทียบอัตราการผิดพลาดของบิตของ PSK แบบต่าง ๆ	42
รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	44
รูปที่ 2.42 ผลตอบสนองวงจรรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ	44
รูปที่ 2.43 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรรองความถี่สูงผ่าน	45
รูปที่ 2.44 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน	45
รูปที่ 2.45 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรรองกำจัดแถบความถี่	46
รูปที่ 2.46 บล็อกไดอะแกรมวงจรเฟสล็อคลูป	47
รูปที่ 2.47 องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรเฟสล็อคลูป	48
รูปที่ 2.48 ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันเรติค ระหว่างความถี่กับระดับแรงดันไฟฟ้าเฟสล็อคลูป	49
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของภาคส่งรับสัญญาณข้อมูล	52
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรโปรแกรมในระบบ	53
รูปที่ 3.3 วงจรฐานข้อมูลเวลาจริง	54
รูปที่ 3.4 วงจรบันทึกข้อมูล	54
รูปที่ 3.5 วงจร RS-485	55
รูปที่ 3.6 โพลวัชาร์ทบริการอินเตอร์รัปต์	57
รูปที่ 3.7 โพลวัชาร์ทส่วนแสดงผล	58
รูปที่ 3.8 วงจรแปลงยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์	58
รูปที่ 3.9 วงจรมอดูเลต	59
รูปที่ 3.10 วงจรรองแถบความถี่ผ่าน	59
รูปที่ 3.11 วงจรรองความถี่ผ่าน 8 KHz แบนด์กว้าง	60
รูปที่ 3.12 วงจรรองความถี่ผ่าน 8 KHz แบนด์แคบ	61
รูปที่ 3.13 วงจรรองแถบความถี่ผ่าน 1 KHz แบนด์แคบ	61
รูปที่ 3.14 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	62

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของเฟสล็อกคูลูป	63
รูปที่ 3.16 วงจรเฟสล็อกคูลูป	64
รูปที่ 3.17 วงจรรวมสัญญาณ	65
รูปที่ 3.18 วงจรส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์	66
รูปที่ 3.19 วงจรส่วนของ BPSK	67
รูปที่ 3.20 วงจรส่วนเครื่องส่งทางด้านรอมเมล์	68
รูปที่ 3.21 วงจรส่วนแสดงผล	69
รูปที่ 3.22 วงจรส่วนเครื่องรับส่วนที่ 1	70
รูปที่ 3.23 วงจรส่วนเครื่องรับแผ่นที่ 2	71
รูปที่ 4.1 สัญญาณนำร่องและสัญญาณคลื่นพาหะที่สร้างขึ้น	72
รูปที่ 4.2 สัญญาณข้อมูลยูนิโพลาร์เทียบกับสัญญาณข้อมูลโพลาร์	72
รูปที่ 4.3 สัญญาณคลื่นพาหะ	73
รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรมอดูเลต	73
รูปที่ 4.5 สัญญาณข้อมูลเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลต	74
รูปที่ 4.6 สัญญาณนำร่อง 1 kHz	74
รูปที่ 4.7 สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรรวมสัญญาณ	75
รูปที่ 4.8 สัญญาณ BPSK รวมกับสัญญาณนำร่องเทียบกับสัญญาณข้อมูล	75
รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ภาคส่งเทียบกับสัญญาณที่ภาครับ รับได้	76
รูปที่ 4.10 สัญญาณข้อมูลของภาคส่งเทียบสัญญาณ BPSK ที่ภาครับ รับได้	76
รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ 8 kHz	77
รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz	77
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเฟสล็อกคูลูป	78
รูปที่ 4.14 สัญญาณอินพุตของวงจรดีมอดูเลต	78
รูปที่ 4.15 สัญญาณเอาต์พุตวงจรดีมอดูเลตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ผ่านวงจร โลพาสฟิลเตอร์	79
รูปที่ 4.16 สัญญาณเอาต์พุต LPF เทียบกับสัญญาณเอาต์พุตวงจรแปลงโพลาร์เป็นยูนิโพลาร์	79
รูปที่ 4.17 สัญญาณข้อมูลที่รับได้เทียบกับสัญญาณข้อมูลที่ส่ง	80
รูปที่ 4.18 สัญญาณนาฬิกาเทียบกับสัญญาณรบกวน	80

บทที่ 1

บทนำ

เมื่อก้าวถึงการ โทรคมนาคมในปัจจุบัน จะเห็นว่ามีการพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับสังคมมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทางด้านข่าวสารหรือสื่อต่าง ๆ ก็มีการพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นอย่างมากมาย ทั้งการโทรคมนาคมทางอากาศ ทางน้ำ หรือทางบกก็มีการพัฒนาเช่นกัน โดยเฉพาะในกรุงเทพฯ มีการพัฒนาการโทรคมนาคมอย่างเช่น รถไฟฟ้า BTS รถไฟฟ้าใต้ดิน และสนามบินสุวรรณภูมิที่กำลังก่อสร้างเพื่อให้ความทันสมัยขึ้นไปเรื่อยๆ และสร้างความสะดวกสบายในการเดินทางมากขึ้น หากกล่าวถึงการโทรคมนาคมทางบกโดยรถประจำทาง ซึ่งเป็นยานพาหนะหนึ่งที่ใช้ประชาชนส่วนใหญ่ใช้ในการเดินทาง แต่ในสภาพการจราจรในกรุงเทพฯ ปัจจุบันค่อนข้างหนาแน่น จึงจำเป็นในการวางแผนก่อนการเดินทาง ดังนั้น หากรู้ตำแหน่งและเวลาของรถประจำทางก่อนที่จะเข้าป้ายก็จะทำให้สามารถวางแผนการเดินทางได้ดียิ่งขึ้น

จากคำกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความจำเป็นที่จะต้องมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างรถประจำทางกับป้ายรถประจำทางและป้ายรถประจำทางจะต้องมีการเชื่อมต่อกัน ในลักษณะเป็นเครือข่ายด้วย ในโครงงานนี้จึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานของทั้งทางรถประจำทางและป้ายรถประจำทาง ในการติดต่อสื่อสารระหว่างรถประจำทางกับป้ายรถประจำทางจะใช้ข้อมูลเป็นดิจิทัลโดยใช้การมอดูเลตแบบดิจิทัล (Digital Modulation) เพื่อให้ข้อมูลมีความเหมาะสมก่อนการส่งผ่านตัวกลางรูปแบบข้อมูลที่ใช้ส่งจะแบ่งเป็นเฟรมและใช้การส่งแบบแบ่งเวลาส่ง ส่วนระหว่างป้ายรถประจำทางกับคอมพิวเตอร์หลักจะใช้การติดต่อในแบบสัญญาณแบนด์มูลฐาน (Baseband Communication) หรืออาจจะเป็นการสื่อสารโดยคลื่นพาห์ (Carrier Communication)

การมอดูเลตดิจิทัลที่ใช้ในโครงงานนี้จะเป็นแบบ Binary Phase Shift Keying (BPSK) และจะถูกนำไปมอดูเลตแบบการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation:FM) เพื่อส่งออกอากาศต่อไป โดยจะใช้ความถี่ในการรับส่ง 2 คู่ความถี่ นั่นคือที่ป้ายรถประจำทางและที่รถประจำทางจะถูกออกแบบให้เป็นทั้งรับและส่งในตัวเดียวกันหรือเรียกว่า Transceiver และการทำงานของรถประจำทางจะถูกควบคุมโดยป้ายรถประจำทาง และป้ายแต่ละป้ายที่เชื่อมต่อกันจะต้องทำงานสัมพันธ์กันเนื่องจากจะต้องมีการรับส่งข้อมูลถึงกันด้วย โดยที่ป้ายแต่ละป้ายจะอ้างอิงการทำงานจากฐานเวลาจริง (Real Time Clock: RTC)

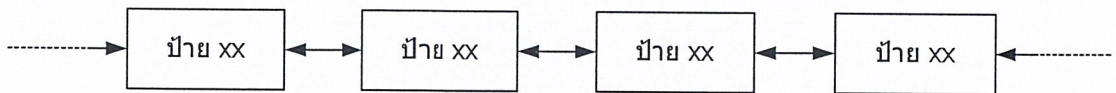
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานในแต่ละส่วนของโครงการรวมถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอธิบายโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

2.1 หลักการของเครือข่ายและโปรโตคอลที่ใช้

ในตัวเมืองใหญ่ ๆ เช่น กรุงเทพมหานคร (ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการอ้างอิงการออกแบบเครือข่ายที่ใช้ในโครงการนี้) ซึ่งมีเส้นทางการเดินทางประจำทางอยู่ค่อนข้างมาก อีกทั้งรถประจำทางในแต่ละสายยังใช้เส้นทางร่วมกันอยู่ก็อีกมาก ดังนั้นการออกแบบเครือข่ายจะต้องคำนึงถึงตรงส่วนนี้ด้วย เวลาที่รถประจำทางใช้เดินทางในแต่ละป้ายในแต่ละช่วงเวลาก็ต้องนำมาพิจารณาด้วยและในโครงการนี้ได้ออกแบบมาเพื่อใช้งานได้จริงตามสภาพปัจจุบันด้วย



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อป้าย

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าแต่ละป้ายจะต่ออนุกรมกันไปเรื่อย ๆ โดยแต่ละป้ายจะทำงานแยกอิสระจากกันเพียงแต่จะต้องทำงานสัมพันธ์กัน โดยอ้างอิงจากฐานเวลาจริง การทำงานระหว่างป้ายโดยสังเขปคือเมื่อรถประจำทางเดินทางมาถึงป้ายใด ๆ ก็ทำการลงทะเบียนเราไว้ ทางด้านป้ายจะตรวจสอบว่าเป็นรถประจำทางสายใดและจะมาถึงป้ายเวลาเท่าใด ก็จะถูกแสดงผลออกไปที่จอแสดง และส่งต่อไปยังป้ายถัดไปที่รถประจำทางคันดังกล่าวจะเดินทางไป เมื่อข้อมูลเดินทางไปถึงป้ายถัดไปในป้ายนั้นจะทำการคาดคะเนเวลาในกระบวนการหนึ่งซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไป และข้อมูลนี้จะถูกแสดงผลในป้ายนั้น ๆ ซึ่งข้อมูลที่แสดงในแต่ละป้ายจะบอกว่า รถประจำทางสายดังกล่าวอยู่ห่างจากป้ายนี้กี่ป้าย และจะใช้เวลานานเท่าใดในการเดินทางมาถึงป้าย ซึ่งจะเป็นอย่างนี้ไปทุกๆ ป้ายที่รถประจำทางคันดังกล่าวจะเดินทางไป

รถประจำทาง



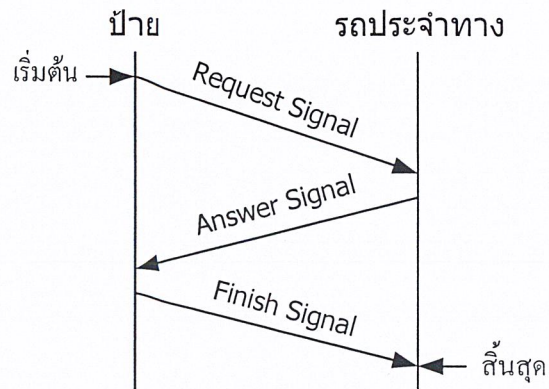
ป้าย



รูปที่ 2.2 การติดต่อระหว่างป้ายกับรถประจำทาง

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่ามีการติดต่อรับส่งข้อมูลกันระหว่างป้ายกับรถประจำทางโดยลำดับการติดต่อจะถูกกำหนดโดยโปรโตคอล (Protocol) ที่ออกแบบไว้แล้ว

2.1.1 โพรโทคอลที่ใช้ระหว่างป้ายกับรถประจำทาง

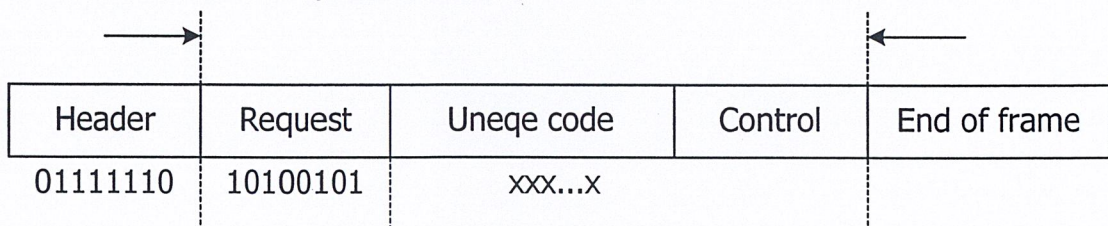


รูปที่ 2.3 ไคอะแกรมการรับส่งข้อมูลระหว่างป้ายกับรถประจำทาง

จากรูปที่ 2.3 เป็นไคอะแกรมการรับส่งข้อมูลระหว่างป้ายกับรถประจำทางเพียงคันเดียวจะเห็นว่าป้ายจะส่งสัญญาณร้องขอ (Request Signal) ออกไปให้กับรถประจำทาง ทางด้านรถประจำทางเมื่อได้รับสัญญาณร้องขอ ก็จะส่งสัญญาณตอบรับ (Answer Signal) กลับไป หลังจากนั้นทางด้านป้ายจะส่งสัญญาณสิ้นสุดการติดต่อ (Finish Signal) ออกไปให้รถประจำทางรับเป็นอันสิ้นสุดการติดต่อกันระหว่างป้ายกับรถประจำทาง 1 คัน

ในทุก ๆ ป้ายจะมีการติดต่อในลักษณะนี้เสมอ สามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละสัญญาณที่ใช้ดังต่อไปนี้

สัญญาณร้องขอ เป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากป้ายเป็นช่วง ๆ อย่างสม่ำเสมอตามคาบเวลาที่ตั้งไว้ จะมีลักษณะของเฟรมข้อมูลเป็นดังนี้



รูปที่ 2.4 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาณร้องขอ

อธิบายแต่ละส่วนในเฟรมได้แก่

Header เป็นส่วนที่บอกเริ่มต้นข้อมูลของเฟรมมีขนาด 8 bit

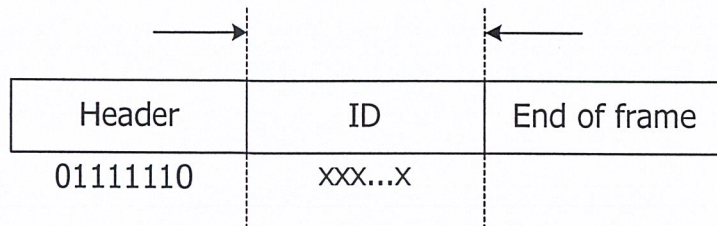
Request ในไบต์ (Byte) นี้เป็นตัวบอกให้รู้ว่าเป็นสัญญาณร้องขอ

Unique code เป็นรหัสที่เฉพาะตัวของแต่ละป้ายซึ่งจะไม่ซ้ำกันจำนวนบิตขึ้นอยู่กับจำนวนการใช้งาน

Control เป็นส่วนที่ใช้ส่งสัญญาณควบคุมต่าง ๆ

End of frame เป็นส่วนที่บอกการสิ้นสุดของเฟรมมีขนาด 8 bit

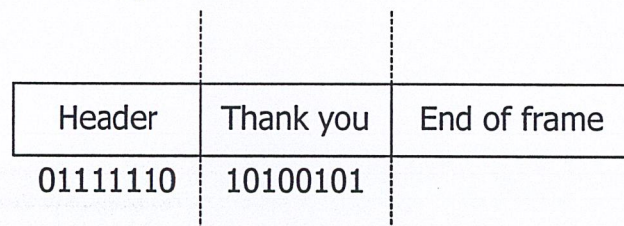
สัญญาตอบรับ เมื่อทางรถประจำทางได้รับสัญญาณร้องขอพร้อมกับอ่านรหัสเฉพาะตัวของป้ายนั้น ๆ แล้วก็จะส่งสัญญาตอบรับนี้ออกไปให้กับป้ายพร้อมกับข้อมูลที่ถูกระบุไว้ ซึ่งลักษณะของเฟรมข้อมูลเป็นดังนี้



รูปที่ 2.5 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาตอบรับ

ID (Identecal) เป็นส่วนที่บอกหมายเลขจ่ายของรถประจำทางจำนวนบิตขึ้นอยู่กับจำนวนการใช้งาน

สัญญาณสิ้นสุดการติดต่อ หน้าที่ของสัญญาณนี้จะเป็นตัวบอกให้รถประจำทางรับรู้ว่าขณะนี้ป้ายได้รับรู้ข้อมูลแล้วให้หยุดส่งข้อมูลได้ ดังนั้นการติดต่อก็ต่อเมื่อทางรถประจำทางได้รับสัญญาณนี้เรียบร้อยแล้ว มีลักษณะของเฟรมข้อมูลเป็นดังนี้



รูปที่ 2.6 การจัดเฟรมข้อมูลของสัญญาณสิ้นสุดการติดต่อ

Thank you เป็นส่วนที่บอกว่าทางป้ายได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้วหยุดส่งข้อมูลได้ ขอบคุณ

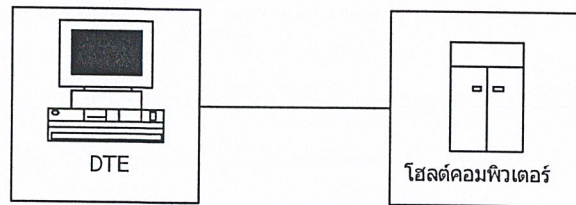
ในหัวข้อที่ผ่านมานี้ได้บอกถึงโปรโตคอลที่ใช้ระหว่างป้ายกับรถประจำทาง ซึ่งเป็นการสื่อสารโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางและข้อมูลที่ส่งเป็นดิจิทัล

2.1.2 โปรโตคอลการสื่อสารระหว่างป้าย

การสื่อสารระหว่างป้ายกับป้ายจะใช้มาตรฐานการสื่อสาร RS-232, RS-422 หรือ RS-485 ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

RS-232C/D (ตัวอักษร C หมายถึงการแก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 3 ของมาตรฐาน RS-232 และในปี พ.ศ. 2530 EIA ได้ปรับปรุง RS-232 ให้เป็นมาตรฐาน RS-232 D) กำหนดอินเทอร์เฟซเชิงตรรกะทำนองเดียวกันกับ V.24 และอินเทอร์เฟซเชิงไฟฟ้า รวมทั้งสิ่งต่าง ๆ ที่จำเป็นในการผลิตมาตรฐานนี้ ซึ่งมาตรฐาน RS-232 จะกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสัญญาณและคุณสมบัติของสายส่ง เช่นเดียวกับ V.28 ที่ใช้เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลได้ความเร็วไม่เกิน 20,000 bps สำหรับระยะทางไม่เกิน 15 เมตร ในมาตรฐาน RS-232 นั้น ได้

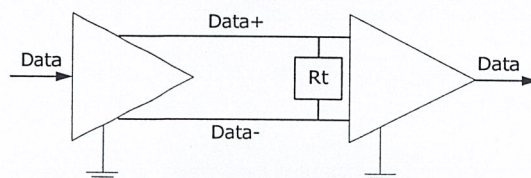
กำหนดรายละเอียดของจำนวนวงจร 25 ชนิด ซึ่งแต่ละวงจรจะใช้สัญญาณแต่ละชนิด และ RS-232C ยังได้กำหนดลักษณะทางไฟฟ้าของสัญญาณ หมายเลขของเข็มต่าง ๆ แต่สำหรับคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของปลั๊กกับรูปลั๊กนั้นไม่ได้กำหนดโดย RS-232C โดยทั่วไปใช้มาตรฐาน DB-25 ส่วน RS-232D ได้กำหนดให้ DB-25 เป็นมาตรฐานของปลั๊ก



รูปที่ 2.7 แสดงการเชื่อมต่อสาย RS-232D กับ DCE ของโหนด

มาตรฐาน RS-232C บอกลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของสัญญาณ เพื่อส่งข้อมูลผ่านสายได้ถึง 20,000 bps สำหรับระยะทางไม่เกิน 15 เมตร รูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณไฟฟ้าของ RS-232D จะเห็นได้ว่าที่ฝั่งส่งจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ในช่วง -5 ถึง -15 โวลต์ เพื่อแสดงสถานะของสัญญาณดิจิทัลที่มีค่าตรรกะเป็น 1 (mark) และส่งแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าในช่วง +5 ถึง +15 โวลต์ เพื่อแสดงค่าตรรกะ 0 (space) และเนื่องจากเมื่อสัญญาณไฟฟ้าผ่านสายจะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ดังนั้นสำหรับฝั่งรับจะถือว่าระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง -15 โวลต์ มีค่าตรรกะเป็น 1 และ +3 ถึง +15 โวลต์มีค่าตรรกะเป็น 0 ถึงแม้มาตรฐาน RS-232C จะกำหนดอัตราการส่งข้อมูลผ่านสายส่งได้ถึง 20,000 bps ในระยะทางไม่เกิน 15 เมตรก็ตาม แต่การส่งข้อมูลผ่านสายในระยะทางที่ไกลกว่านี้ ก็อาจทำได้โดยที่ความเร็วของการส่งข้อมูลก็จะลดลง และอาจส่งข้อมูลได้มากกว่า 20,000 bps ในระยะสั้นกว่า 15 เมตร

RS-422 เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อเชิงไฟฟ้า ระหว่าง DTE (Data Terminal Equipment) ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับหรือส่งข้อมูล เช่น computer, printer กับ DCE (Data communication Equipment) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนข้อมูลเป็นรูปแบบพลังงานที่เหมาะสมก่อนส่งเข้าไปในเครือข่าย เช่น Modem สามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วสูง วงจรไฟฟ้าของ RS-422 เป็นแบบ balanced voltage digital interface circuit แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Balanced Signaling

สายสัญญาณของ RS-422 จะมีสายดินของตัวเอง และสายสัญญาณถูกออกแบบให้พันอยู่กับสายดิน ดังนั้นหากมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น สัญญาณรบกวนจะมีผลทั้งสายดินและสายสัญญาณ ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองเปลี่ยนไปเช่นเดียวกัน และทำให้ทางด้านรับเห็นวาระดับแรงดันไฟฟ้าของสายทั้งสองไม่

เปลี่ยนแปลง กล่าวคือไม่เห็นว่ามัลติสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในสาย นั่นคือทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีมาก จึงทำให้ส่งข้อมูลได้ระยะทางไกลขึ้นในระยะประมาณ 4000 บิต หรือประมาณ 1,200 เมตร

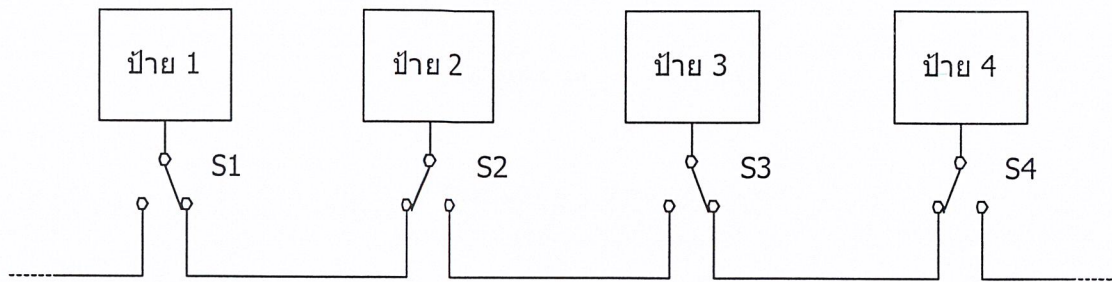
RS-485 ซึ่งเป็นตัวที่พัฒนามาจาก RS-422 ซึ่งสามารถต่อพ่วงอุปกรณ์ได้หลายตัวในสายเพียงเส้นเดียว ซึ่งสามารถต่อได้สูงสุดคือ 32 ตัวส่งและ 32 ตัวรับ และสามารถเชื่อมต่อแบบ 2 เส้นหรือ 4 เส้นก็ได้ ระยะทางในการสื่อสาร 4000 บิต ใช้หลักการส่งสัญญาณแบบ differential voltage transmission system ในโครงการนี้จะใช้โปรโตคอลการสื่อสารแบบ RS-485 เนื่องจากให้ระยะทางไกลที่สุด หากระยะทางไกลกว่านี้ จึงจะใช้การทวนสัญญาณ

	RS-232	RS-422	RS-485
Mode of Operation	Single ended	differential	differential
Drivers per Line	1	1	32
Receivers per Line	1	10	32
Maximum Cable Length	50 feet	4000 feet	4000 feet
Maximum Data Rate	20 kbps	10 Mbps	10 Mbps
Driver Output Maximum Voltage	±25 V	-0.25 to +6 V	-7 to +12 V
Driver Output Signal Level (loaded)	±5 V	±2 V	±1.5 V
Driver Output Signal Level (unloaded)	±15 V	±5 V	±5 V
Driver Load Impedance	3 kΩ to 7 kΩ	100 kΩ	54 kΩ
Max. Driver Output Current (Power on)	n/a	n/a	±100 μA
Max. Driver Output Current (Power off)	V ^{MAX/300Ω}	±100 μA	±100 μA
Slew Rate	30 V/μs max.	n/a	n/a
Receiver Input Voltage Range	±15 V	-7 V to +7 V	-7 V to +12V
Receiver Input Sensitivity	±3 V	±200 mV	±200 mV
Receiver Input Resistance	3 kΩ to 7 kΩ	4 kΩ	12 kΩ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบ RS-232, RS-422, RS-485

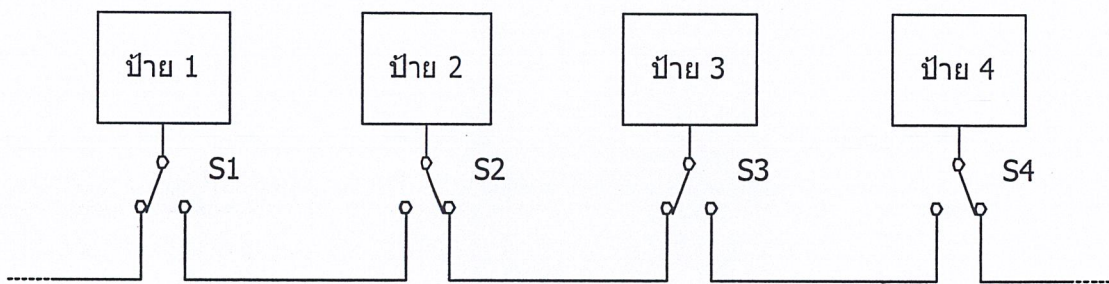
2.1.3 การจัดการลำดับการสื่อสารระหว่างป้ายกับป้าย

ในระบบย่อยนี้ป้ายแต่ละป้ายจะต่ออนุกรมกันไปเรื่อย ๆ นั่นคือ ทุก ๆ ป้ายจะใช้สายสัญญาณสื่อสารร่วมกันในการที่จะติดต่อกันอธิบายลำดับการติดต่อได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงการติดต่อระหว่างป้าย 1

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่า S1 กับ S2 จะต้องสัมผัสกัน และ S3 กับ S4 ก็จะต้องสัมผัสเช่นเดียวกัน เหตุที่ต้องเป็นเช่นนี้ เนื่องจากในโครงงานนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมในการรับ - ส่ง ข้อมูลระหว่างป้ายกับรถประจำทาง และป้ายกับป้าย เป็นตัวเดียวกัน ดังนั้นต้องมีการจัดการการทำงานของแต่ละป้ายให้สัมพันธ์กันด้วย ซึ่งอธิบายได้ว่า ในครั้งแรก S1 กับ S2 สัมผัสกันเพื่อให้ป้าย 1 กับป้าย 2 ติดต่อกันได้พร้อมกันนั้นในเวลาเดียวกัน S3 กับ S4 ก็สัมผัสกันเพื่อให้ป้าย 3 กับป้าย 4 ติดต่อกันได้ หลังจากที่ตั้ง 2 คู่ติดต่อกันเรียบร้อยแล้ว S1, S2, S3, S4 ก็จะเปลี่ยนทิศทางการติดต่อดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการติดต่อระหว่างป้าย 2

ลักษณะของเฟรมข้อมูลที่ใช้ติดต่อดังนี้

Bus number	Position	Time	Control
------------	----------	------	---------

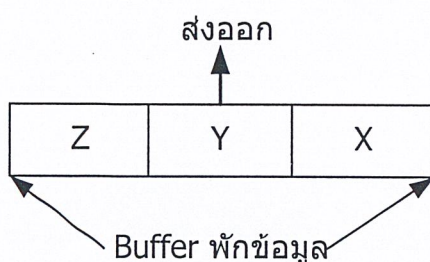
รูปที่ 2.11 การจัดเฟรมข้อมูลในการส่งข้อมูล

Bus number	เป็นหมายเลขของรถประจำทางด้านที่กำลังเดินทางมาถึงป้ายนี้
Position	เป็นตำแหน่งที่รถประจำทางอยู่ก่อนที่จะมาถึงป้ายนี้
Time	เป็นเวลาที่ใช้รถประจำทางใช้เดินทางมาถึงป้ายนี้ ซึ่งเป็นระยะเวลาในการรอคอยการมาถึงป้ายนี้ของรถประจำทาง
Control	เป็นสัญญาณควบคุมบางอย่าง เช่น การขอข้อมูลซ้ำครั้งล่าสุด เป็นต้น



รูปที่ 2.12 การจัดเฟรมข้อมูลในการตอบรับ

ACK/NACK บ่งบอกถึงความสมบูรณ์ในการรับ — ส่ง เป็นส่วนที่บอกว่าข้อมูลที่รับได้ถูกต้องหรือไม่อย่างไร โดยไปรับรู้ (Acknowledge) บอกว่ารับข้อมูลเรียบร้อยแล้วหากเป็นไปที่ไม่รับรู้หรือผิดพลาด (No-Acknowledge) บอกว่าข้อมูลผิดพลาด



รูปที่ 2.13 การจัดการข้อมูลก่อนส่ง

จากรูปที่ 2.13 อธิบายได้ว่าข้อมูลเข้ามาใหม่จากทางขวามือเป็นข้อมูลที่รอส่ง (X) ข้อมูลถัดมาเป็นข้อมูลที่ส่งปัจจุบัน (Y) ซึ่งถูกเลื่อนมาจาก (X) และเมื่อส่งออกไปแล้วจะถูกเก็บเอาไว้ก่อนเพื่อการเรียกซ้ำ หากไม่มีการเรียกซ้ำก็就会被เลื่อนออกไปเมื่อการติดต่อร์ับส่งข้อมูลครั้งต่อไปมาถึง Time เป็นเวลาที่รถประจำทางที่มาลงทะเบียนไว้มาถึง

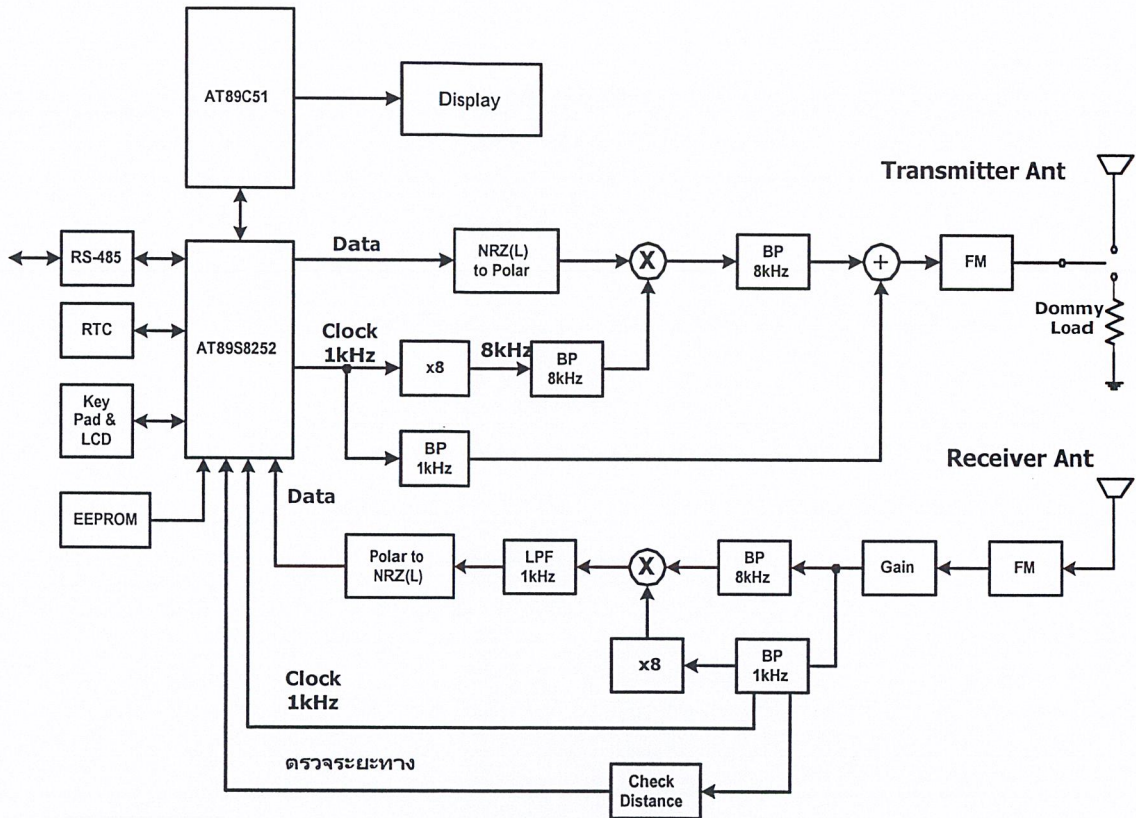
หมายเหตุ : เวลาที่ใช้บอกความละเอียดที่ ชั่วโมง กับ นาที

ในการติดต่อระหว่างป้ายกับป้ายของระบบย่อยนั้น ในแต่ละป้ายระยะห่างไม่เท่ากัน ในแต่ละพื้นที่ ซึ่งบางระยะจำเป็นต้องมีตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ด้วย ซึ่งทำให้ที่ป้ายอาจจะเป็นตัวทวนสัญญาณด้วยเมื่อที่จะส่งข้อมูลไปถึงป้ายที่อยู่ปลายทางได้

2.2 หลักการทำงานในส่วนการรับและส่งข้อมูล

จากหลักการที่ได้อธิบายมาแล้วเบื้องต้น สามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมเพื่ออธิบายรายละเอียดของหลักการทำงานและใช้ในการออกแบบวงจรที่นำไปใช้งานต่อไป

2.2.1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ — ส่ง ทางด้านป้ายรถประจำทาง

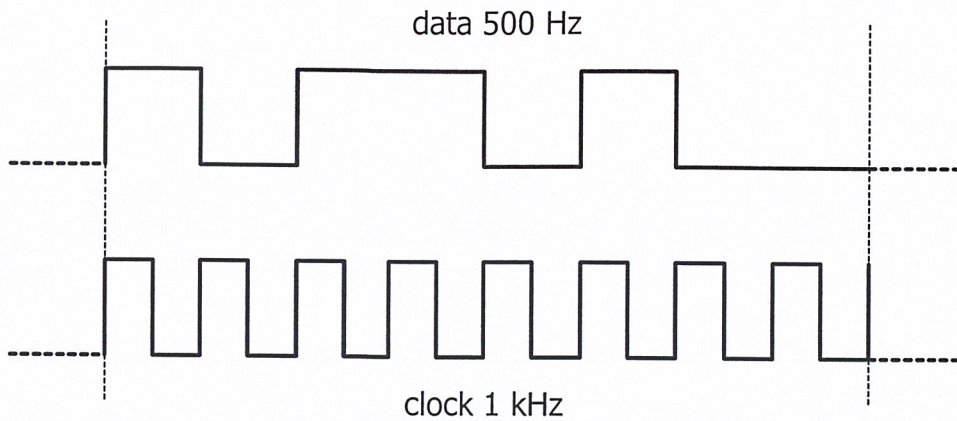


รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมทางด้านป้ายรถประจำทาง

จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่าไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89S8252 เป็นตัวควบคุมการทำงานหลักทั้งหมด โดยจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. การส่งข้อมูล

คอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวกำเนิดข้อมูลออกมาที่ขา data/out ส่งไปให้ส่วนการแปลงสัญญาณข้อมูล จากยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์เพื่อความเหมาะสมในการนำไปมอดูเลตต่อไปพร้อมกันนั้นก็จะกำเนิดสัญญาณนาฬิกาออกมาที่ขา clock ซึ่งมีความถี่ 1 kHz เป็นสัญญาณแบบยูนิโพลาร์ (NRZ(L)) โดยสัญญาณนาฬิกาที่กำเนิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับสัญญาณข้อมูลดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สัญญาณข้อมูลเทียบกับสัญญาณนาฬิกา

สัญญาณนาฬิกาจะถูกป้อนเข้าที่วงจรเฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop : PLL) เพื่อทำหน้าที่ทวีคูณความถี่ขึ้น 8 เท่าคือจาก 1 kHz เป็น 8 kHz สัญญาณ 8 kHz นี้จะนำไปผ่านวงจรรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter : BP) เพื่อให้ได้สัญญาณไซน์ซึ่งเราจะเรียกสัญญาณที่ผ่านวงจรรองแถบความถี่ผ่าน 8 kHz นี้ว่าสัญญาณพาหะของสัญญาณ BPSK หลังจากนั้นจะเห็นว่าสัญญาณข้อมูลที่เป็นแบบโพลาร์กับสัญญาณพาหะจะถูกนำมามอดูเลตด้วยวงจรมอดูเลตแบบสมดุล (Balance Modulation) ซึ่งเอาท์พุทของวงจรมอดูเลตจะเป็นสัญญาณ BPSK แล้วสัญญาณ BPSK นี้ก่อนที่จะนำไปมอดูเลตแบบการมอดูเลตความถี่เพื่อส่งออกอากาศจะผ่านวงจรรองแถบความถี่ผ่านก่อนเพื่อเป็นการจำกัดแถบความถี่ของสัญญาณ BPSK ในการออกแบบการรับ-ส่ง แบบ BPSK นี้จำเป็นที่จะต้องมียุติสัญญาณนาฬิกาด้วยเพื่อใช้ในการดีมอดูเลตสัญญาณข้อมูลกลับคืนมา ดังนั้นเราจึงใช้การส่งสัญญาณนำร่อง (Pilot Signal) เพื่อให้ทางด้านรับใช้เป็นสัญญาณในการกู้สัญญาณนาฬิกาเพื่อนำไปสร้างสัญญาณพาหะและใช้ในการดีมอดูเลตต่อไปได้

AT89S8252 จะเชื่อมต่อกับ AT89C51 ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนแสดงผลสายรถประจำทาง ป้าย และเวลา ซึ่งใช้ 7-segment 12 หลักในการแสดงผล ซึ่ง AT89S8252 จะเป็นตัวส่งข้อมูลไปให้ AT89C51 แสดงผลอีกทีหนึ่ง

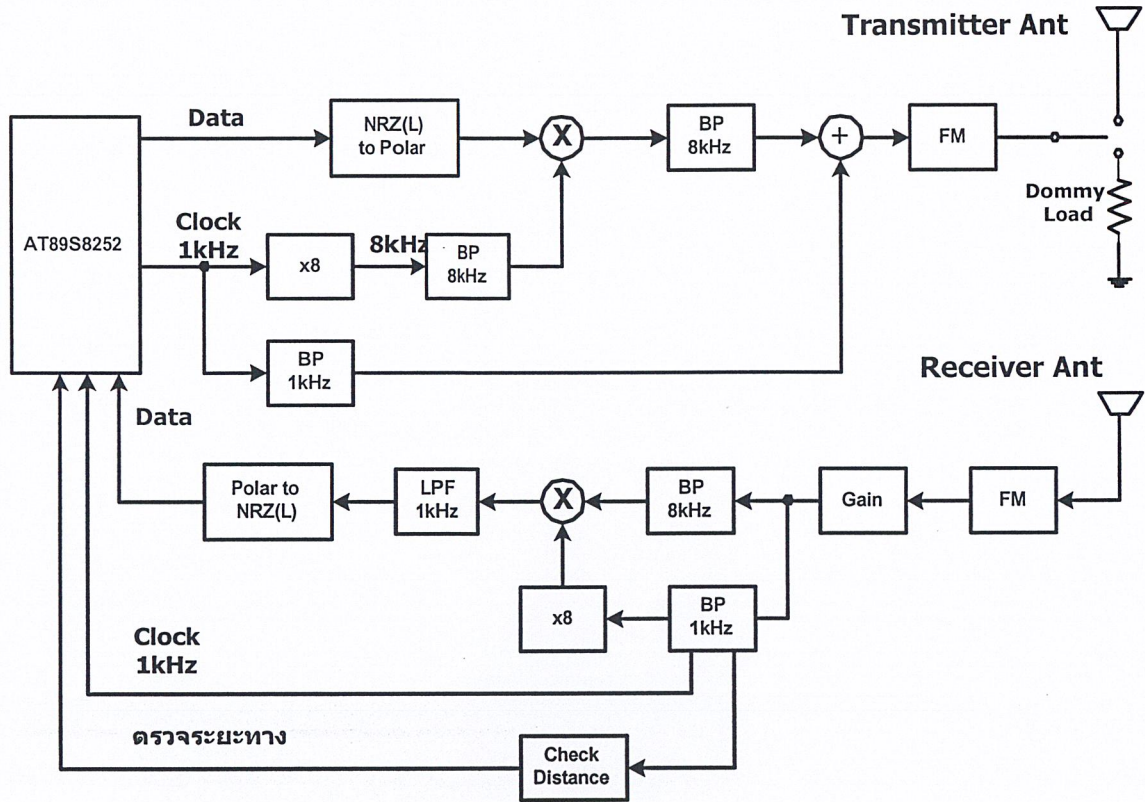
ในส่วนของฐานข้อมูลเวลาจริง (RTC) ซึ่งใช้ในการอ้างอิงการทำงาน คีย์แพดและจอแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD) จะใช้ในการโปรแกรมเวลา วัน เดือน ปี และโปรแกรมสายรถประจำทางในปีนั้น ๆ ในส่วนของ RS-485 จะใช้ในการติดต่อรับ-ส่งข้อมูลระหว่างป้าย EEPROM ก็จะใช้เก็บฐานข้อมูล

2. การรับข้อมูล

สัญญาณข้อมูลที่รับได้มีความแรงน้อยจึงต้องผ่านวงจรมอดูเลตก่อนที่จะไปผ่านวงจรรองแถบความถี่ผ่าน 8 kHz และ 1 kHz เพื่อจะได้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรมอดูเลต สัญญาณที่ได้จากเอาท์พุทของวงจรมอดูเลตจะผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อจะได้เฉพาะสัญญาณข้อมูลแบบโพลาร์จากนั้นก็ผ่านวงจรมอดูเลตสัญญาณโพลาร์เป็นยูนิโพลาร์ก็ได้เป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัลป้อนให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณเอาท์พุทของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz จะนำไปเป็นสัญญาณนาฬิกาให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเปรียบสัญญาณนาฬิกาที่ส่งมากับที่รับได้ว่าตรงกันหรือไม่ และที่เอาท์พุทของวงจรรอง

แถบความถี่ผ่านนี้จะใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการตรวจจับสัญญาณความแรงเพื่อใช้ตรวจจับระยะทางและใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการบอกสายรถเมล์และเวลาที่ถึงป้ายของรถเมล์ที่ตรวจจับได้สุดท้ายก็ส่งออกแสดงผลโดย 7 – segment

2.2.2 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ - ส่งทางด้านรถประจำทาง



รูปที่ 2.16 บล็อกไดอะแกรมทางด้านรถประจำทาง

ในส่วนของรถประจำทางจะมีบล็อกไดอะแกรมส่วนมากเหมือนกับทางด้านป้ายจะแตกต่างกันตรงที่ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงตัวเดียว ทำหน้าที่ควบคุมการรับส่งข้อมูลระหว่างรถประจำทางกับป้ายเท่านั้น และเพิ่มเติมส่วนแสดงสถานะการทำงานอีกบล็อกหนึ่ง ซึ่งใช้บอกสถานะการทำงานต่างๆ ให้กับพนักงานขับรถ ได้รับรู้การทำงานอีกทั้งยังใช้ตรวจสอบการทำงานได้ว่ายังทำงานอย่างถูกต้องอยู่

ในส่วนกำลังส่งที่ใช้ในแบบจำลองนี้มีค่าไม่มากอยู่ในช่วงมิลลิวัตต์ เนื่องจากยังไม่ต้องการกำลังส่งมาก แต่ถึงจะเป็นการใช้งานจริงกำลังส่งที่ใช้ก็ไม่มากอยู่แล้วเนื่องจากระยะที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารอยู่ในระยะประมาณ 50 ถึง 100 เมตรเท่านั้น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในแต่ละบล็อก โดยจะอธิบายรวมกันทั้งด้านป้ายรถประจำทางและรถประจำทาง

2.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ในโครงการนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ซึ่งการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ควบคุมการทำงานทางด้านป้ายรถประจำทางจะใช้เบอร์ AT89S8252 ซึ่งมี 40 ขา และทางด้านรถประจำทางใช้เบอร์ AT89C2051 ซึ่งมี 20 ขา ซึ่งจะอธิบายหลักการงานเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้เท่านั้น รายละเอียดดูได้ที่ภาคผนวก

AT89S8252

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้มีโครงสร้างภายในและหลักการงานต่าง ๆ เหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูลเดียวกัน ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 bit และมีหน่วยความจำแบบ Flash Memory ที่สามารถเขียนและลบโปรแกรมได้ 1000 ครั้งขนาด 8 kbyte โดยใช้หลักการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก แบบอนุกรม (Serial Peripheral Interface ; SPI) อีกทั้งยังมีหน่วยความจำแบบเขียนและลบได้ด้วยไฟฟ้า (EEPROM) ขนาด 2 kbyte ที่สามารถเขียนและลบได้ 100,000 ครั้ง

(T2) P1.0	1	40	VCC
(T2 EX) P1.1	2	39	PO.0 (AD0)
P1.2	3	38	PO.1 (AD1)
P1.3	4	37	PO.2 (AD2)
(SS) P1.4	5	36	PO.3 (AD3)
(MOSI) P1.5	6	35	PO.4 (AD4)
(MISO) P1.6	7	34	PO.5 (AD5)
(SCK) P1.7	8	33	PO.6 (AD6)
RST	9	32	PO.7 (AD7)
(RXD) P3.0	10	31	EA/PP
(TXD) P3.1	11	30	ALE/PROG
(INT0) P3.2	12	29	PSEN
(INT1) P3.3	13	28	P2.7 (A15)
(T0) P3.4	14	27	P2.6 (A14)
(T1) P3.5	15	26	P2.5 (A13)
(WR) P3.6	16	25	P2.4 (A12)
(RD) P3.7	17	24	P2.3 (A11)
XTAL2	18	23	P2.2 (A10)
XTAL1	19	22	P2.1 (A9)
GND	20	21	P2.0 (A8)

รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งขาของ AT89C2051

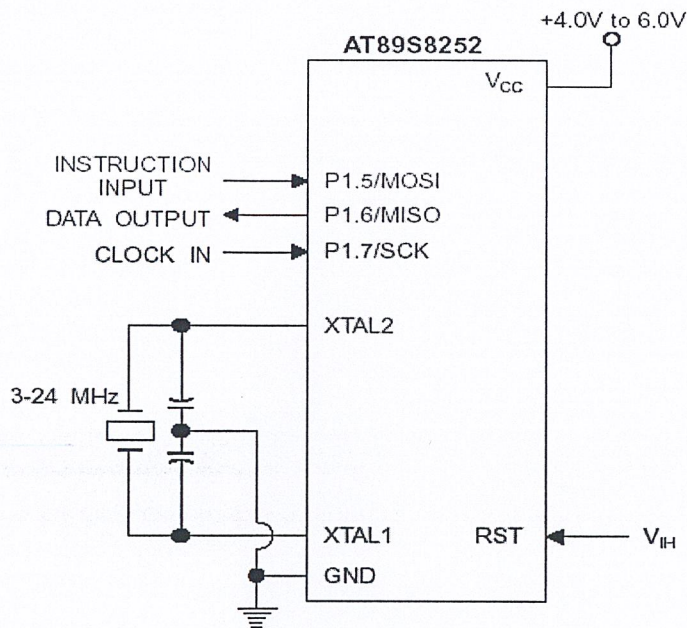
ในที่นี้ขออธิบายส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

2.2.1.1 การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกแบบอนุกรม

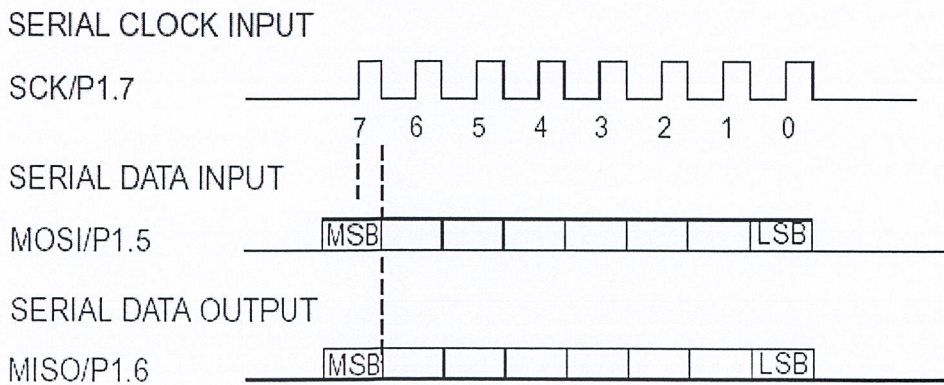
เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้ลักษณะของการส่งผ่านข้อมูลแบบเข้าจังหวะ (Synchronous Data Transfer) ใช้ติดต่อระหว่าง AT89S8252 กับอุปกรณ์ภายนอก (Peripheral Devices) หรือระหว่าง AT89S8252 ด้วยกัน ซึ่งมีลักษณะสำคัญดังนี้

- ใช้การเชื่อมต่อแบบทางคู่ (Full Duplex) ใช้สาย 3 เส้น ลักษณะของการรับส่งข้อมูลเป็นแบบจังหวะ
- ปฏิบัติการได้ทั้ง Master หรือ Slave
- 1.5 MHz Bit Frequency (สูงสุด)
- ส่งผ่านข้อมูลแบบบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดเริ่มก่อนหรือบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดก่อนก็ได้
- โปรแกรมอัตราส่งข้อมูล (Bit Bate) ได้ 4 ระดับ

ในหลักการนี้นำมาใช้ในการเขียนโปรแกรมสู่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยไม่ต้องถอดออกมาจากวงจรที่ใช้งานอยู่เพียงแค่เพิ่มเติมวงจรบางส่วนเข้าไปก็สามารถที่จะเขียนโปรแกรมได้โดยไม่ต้องถอดออกมา เรียกว่าการดาวน์โหลดแบบอนุกรม (Serial Downloading)



รูปที่ 2.18 วงจรพื้นฐานการลงโปรแกรมแบบอนุกรม



รูปที่ 2.19 สัญญาณที่ใช้ในการดาวน์โหลดแบบอนุกรม

2.2.1.2 การควบคุมการรับส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตและรีจิสเตอร์

ในการรับส่งข้อมูลโดยควบคุมผ่านทางพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในเบอร์ AT89S8252 มีอยู่ทั้งหมด 4 พอร์ต โดยการทำงานส่วนใหญ่อยู่ที่ตัวโปรแกรมและการใช้งานพอร์ตต้องคำนึงถึงกระแสที่ขับทางด้านเอาต์พุตด้วย ซึ่งโดยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เองก็มีกระแสขับไม่สูงนักจึงจำเป็นต้องมีการใช้ตัวช่วยขับกระแส (IC Driver) มาช่วยด้วย เช่น การขับ LED หรือ 7 Segment

รีจิสเตอร์

รีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ (Special Function Register : SFR)

เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51 มีด้วยกัน 22 ตัว สำหรับเบอร์ AT89C51 และ 28 ตัวในเบอร์ AT89C52 และอนุกรม AT89Sxx ทั้งนี้เนื่องจากใน AT89C52 และ AT89Sxx มีจำนวนไทมเมอร์เคาน์เตอร์มากกว่า AT89C51 รีจิสเตอร์ SFR มีแอดเดรสอยู่ระหว่าง 80H-FFH ในพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลส่วนบน สามารถเข้าถึงได้โดยตรง

รีจิสเตอร์แสดงสถานะของโปรแกรม (Program Status Word : PSW)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต จึงสามารถกำหนดค่าในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์ตัวนี้ได้อย่างอิสระ มีแอดเดรสอยู่ที่ D0H ทำหน้าที่เก็บสถานะของการทำงานของโปรแกรมในขณะนั้นจะเรียกสถานะต่างๆ ของโปรแกรมว่า แฟล็ก (flag) เมื่อซีพียูกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์และลอจิกแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะขึ้น ผลของการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมาปรากฏที่บิตต่างๆ ของรีจิสเตอร์ PSW แสดงในรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า นอกจากรีจิสเตอร์ PSW ถูกใช้ในการเก็บสถานะของโปรแกรมแล้วที่บิต RS0 และ RS1 ยังใช้ในการเลือกแบงก์ของหน่วยความจำส่วนล่าง ซึ่งเป็นพื้นที่ของรีจิสเตอร์ R0 - R7 ด้วย ดังมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.2 โดยปกติแล้วในการใช้งานรีจิสเตอร์ R0 - R7 มักนิยมใช้แบงก์ 0 เป็นลำดับแรก หากไม่เพียงพอจึงเลือกในแบงก์อื่นๆ มาใช้ แต่ต้องระมัดระวังในการกำหนดค่าและลำดับการติดต่อให้ดี มิเช่นนั้น อาจทำให้การเขียนโปรแกรมเกิดความสับสน การกำหนดค่าของรีจิสเตอร์ PSW เพื่อเลือกใช้รีจิสเตอร์ R0 - R7 ควรกำหนดไว้ที่ตอนต้นของโปรแกรมเสมอ เพื่อจะได้เขียนโปรแกรมติดต่อกับรีจิสเตอร์ R0 - R7 ได้อย่างสะดวกและไม่เกิดความผิดพลาด

RS1	RS0	แบงก์ของรีจิสเตอร์	ช่วงแอดเดรส
0	0	แบงก์ 0	00H - 07H
0	1	แบงก์ 1	08H - 0FH
1	0	แบงก์ 2	10H - 17H
1	1	แบงก์ 3	18H - 1FH

ตารางที่ 2.2 การเลือกแบงก์ของหน่วยความจำส่วนล่างเพื่อติดต่อกับรีจิสเตอร์แบงก์ R0 - R7

แอกคิวมูเลเตอร์(Accumulator:ACC)

มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ตำแหน่ง E0H เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก ก่อนที่จะส่งข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่ได้ให้แก่อุปกรณ์เพื่อทำการประมวลผลต่อไป อาจเรียกสั้นๆว่า รีจิสเตอร์ A หรือ ACC รีจิสเตอร์นี้สามารถเข้าถึงระดับบิตได้

รีจิสเตอร์ B

มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ FOH มีหน้าที่พิเศษคือ หากต้องการคูณหรือหารทางคณิตศาสตร์ ต้องนำข้อมูลที่ต้องการหารหรือคูณมาเก็บไว้ในรีจิสเตอร์ B แล้วจึงกระทำคำสั่งการคูณหรือหารกับค่าในรีจิสเตอร์ A ต่อไป

ในกรณีที่ไม่ได้มีความต้องการคูณหรือหารข้อมูล สามารถใช้รีจิสเตอร์ B นี้ในการเก็บข้อมูลทั่วไปได้เหมือนกับรีจิสเตอร์ปกติ และสามารถเข้าถึงในระดับบิตได้เช่นเดียวกับรีจิสเตอร์ A

โปรแกรมเคาน์เตอร์(Program Counter : PC)

มีขนาด 16 บิต มีหน้าที่แจ้งแอดเดรสของหน่วยความจำโปรแกรมในตำแหน่งถัดไปที่ซีพียูจะต้องไปทำงาน รีจิสเตอร์ PC เป็นรีจิสเตอร์ตัวเดียวที่ไม่ได้จัดสรรไว้ร่วมกับรีจิสเตอร์ SER ตัวอื่น ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าของรีจิสเตอร์ PC จะขึ้นอยู่กับผลของการกระทำคำสั่งภายในหน่วยความจำโปรแกรมที่ผู้เขียนโปรแกรมกำหนด

รีจิสเตอร์ PC มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมว่าดำเนินไปตามลำดับขั้นตอนที่กำหนดไว้หรือไม่

สแต็กพอยน์เตอร์ (Stack Pointer : SP)

หรือรีจิสเตอร์ตัวชี้สแต็ก มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 81H ใช้ในการเก็บค่าตำแหน่งของตัวชี้สแต็ก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อซีพียูมีการกระโดดไปทำงานที่โปรแกรมย่อย หรือกระโดด โปรแกรมย่อย กลับมายังโปรแกรมหลักเมื่อมีการรีเซตเกิดขึ้น (รีเซต : การกระทำที่ส่งผลให้ซีพียูต้องเริ่มต้นการทำงานใหม่ตั้งแต่ต้น) ค่าของรีจิสเตอร์ SP จะเท่ากับ 07H ดังนั้นแอดเดรสแรกของพื้นที่ที่สำรองไว้ทำหน้าที่เป็นสแต็กจะเท่ากับ 08H

รีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลหรือดาต้าพอยน์เตอร์ (Data Pointer : DPTR)

มีขนาด 16 บิต โดยแบ่งเป็นรีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลไปต์สูง (DPH) และรีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลไปต์ต่ำ (DPL) แต่ละตัวมีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 82H สำหรับ DPL และ 83H สำหรับ DPH รีจิสเตอร์ DPTR นี้ใช้ในการเก็บค่าแอดเดรสของหน่วยงานความจำหรืออุปกรณ์ภายนอกที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการติดต่อด้วย

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
CY	AC	FO	RS1	RS0	OV	-	P

- CY : แพลกทอด (Carry flag) เป็น “1” เมื่อมีการกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์และลอจิกแล้ว ค่าของแอกคิวมูลเตเตอร์เกิน 225 (ฐานสิบ) หรือ FFH
- AC : แพลกทอดเสริม (Auxiliary Carry flag) เป็น “1” เมื่อมีการกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์แล้วทำให้เกิดการทดข้ามจากบิต 3 มายังบิต 4
- FO : แพลกใช้งานทั่วไป เมื่อผู้เขียนโปรแกรมกำหนดค่าที่บิตนี้แล้ว ไม่ว่าจะกระทำคำสั่งใด ๆ ที่บิตนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- RS1 : บิตเลือกรีจิสเตอร์แเบงก์ (Register Select 1) ใช้งานร่วมกับบิต RS0 เพื่อเลือกแเบงก์ของรีจิสเตอร์ RO-R7
- RS0 : บิตเลือกรีจิสเตอร์แเบงก์ (Register Select 0) ใช้งานร่วมกับบิต RS1 เพื่อเลือกแเบงก์ของรีจิสเตอร์ RO-R7
- OV : บิตเกิน (Overflow) เป็น “1” เมื่อมีการกระทำคำสั่งทางคณิตศาสตร์และลอจิกแล้ว ทำให้เกิดการทดข้ามจากบิต 6 มายังบิต 7 ของแอกคิวมูลเตเตอร์ หรือแอกคิวมูลเตเตอร์มีค่าเกิน 127 (ฐานสิบ) นอกจากนั้นยังใช้เป็นการแสดงค่าลบด้วย
- : บิตนี้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดใช้งานได้อย่างอิสระ
- P : บิตพาริตี (Parity) ใช้ในการตรวจสอบจำนวนค่า “1” ภายในแอกคิวมูลเตเตอร์ ถ้าหากในแอกคิวมูลเตเตอร์มีจำนวนบิตที่เป็น “1” รวมกันเป็นเลขคู่ บิตนี้จะเป็น “0” ถ้ารวมกันเป็นเลขคี่ บิตนี้จะเป็น “1”

รูปที่ 2.20 รายละเอียดของรีจิสเตอร์แสดงสถานะของโปรแกรมหรือ PSW

สแต็กพอยน์เตอร์ (Stack Pointer : SP)

หรือรีจิสเตอร์ตัวชี้สแต็ก มีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 81H ใช้ในการเก็บค่าตำแหน่งของตัวชี้สแต็ก ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อซีพียูมีการกระโดดไปทำงานที่โปรแกรมย่อย หรือกระโดด โปรแกรมย่อย กลับมายังโปรแกรมหลักเมื่อมีการรีเซตเกิดขึ้น (รีเซต : การกระทำที่ส่งผลให้ซีพียูต้องเริ่มต้นการทำงานใหม่ตั้งแต่ต้น) ค่าของรีจิสเตอร์ SP จะเท่ากับ 07H ดังนั้นแอดเดรสแรกของพื้นที่ที่สำรองไว้ทำหน้าที่เป็นสแต็กจะเท่ากับ 08H

รีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลหรือดาต้าพอยน์เตอร์ (Data Pointer : DPTR)

มีขนาด 16 บิต โดยแบ่งเป็นรีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลไบต์สูง (DPH) และรีจิสเตอร์ชี้ข้อมูลไบต์ต่ำ (DPL) แต่ละตัวมีขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 82H สำหรับ DPL และ 83H สำหรับ DPH รีจิสเตอร์ DPTR นี้ใช้ในการเก็บค่าแอดเดรสของหน่วยงานความจำหรืออุปกรณ์ภายนอกที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ต้องการติดต่อกับ

รีจิสเตอร์พอร์ต (Port register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต ที่ใช้เก็บข้อมูลของแต่ละพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 มี 4 ตัวคือ รีจิสเตอร์พอร์ต 0 หรือ P0 มีแอดเดรสอยู่ที่ 80H รีจิสเตอร์พอร์ต 1 หรือ P1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 90H รีจิสเตอร์พอร์ต 2 หรือ P2 มีแอดเดรสอยู่ที่ A0H และรีจิสเตอร์พอร์ต 3 หรือ P3 มีแอดเดรสอยู่ที่ B0H รีจิสเตอร์ทุกตัวสามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต เมื่อต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลออกไปยังพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะต้องกระทำผ่านรีจิสเตอร์นี้ทุกครั้ง

รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ข้อมูลอนุกรม (Serial Data Buffer : SBUF)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 99H ใช้ในการเก็บข้อมูลที่ส่งออกหรือรับเข้าของวงจรสื่อสารอนุกรมที่มีอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช โดยภายในรีจิสเตอร์ SBUF นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ รีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูล (transmit buffer register) และรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูล (receive buffer register) เมื่อมีการเขียนข้อมูลมายังรีจิสเตอร์ SBUF ข้อมูลนั้นจะถูกส่งต่อไปยังบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลเพื่อส่งออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางขา TxD หรือขา P3.1 ในกรณีที่มีการอ่านข้อมูลจากรีจิสเตอร์ SBUF ข้อมูลจะถูกส่งผ่านไปยังรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับรับข้อมูลเพื่อส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป สำหรับการรับข้อมูลอนุกรมจากภายนอกนั้นจะผ่านมาจากขา RxD หรือ P3.0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

รีจิสเตอร์ไทมเมอร์ (Timer register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต แบ่งเป็นไบต์สูงและไบต์ต่ำเช่นเดียวกับรีจิสเตอร์ DPTR รีจิสเตอร์ไทมเมอร์ใช้ในการเก็บค่าของตัวนับหรือเคาน์เตอร์ (counter) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ในการสร้างฐานเวลา, จับเวลา หรือนับจำนวนพัลส์สัญญาณนาฬิกาภายใน บางที่เรียกรีจิสเตอร์ตัวนี้ว่า รีจิสเตอร์ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51 มีรีจิสเตอร์ ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 ตัว แบ่งเป็น T0 หรือ Timer 0 และ T1 หรือ Timer 1 ในรีจิสเตอร์ยังแบ่งเป็นรีจิสเตอร์ไทมเมอร์ไบต์ต่ำ (TL) และรีจิสเตอร์ไทมเมอร์ไบต์สูง (TH) เหมือนกัน โดยรีจิสเตอร์ TL0 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8AH รีจิสเตอร์ TH0 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8BH ในขณะที่ TL1 และ TH1 มีแอดเดรสอยู่ที่ 8CH และ 8DH สำหรับในเบอร์ AT89C52 และในอนุกรม AT89xx จะมีรีจิสเตอร์ไทมเมอร์ / เคาน์เตอร์ถึง 3 ตัว โดยมีรีจิสเตอร์ TL2 และ TH2 ซึ่งมีแอดเดรสอยู่ที่ 0CCH และ 0CDH เพิ่มเติมเข้ามา

รีจิสเตอร์แคปเจอร์ (Capture register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต มีเฉพาะในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชเบอร์ AT89C52 และในอนุกรม AT89Sxx เท่านั้น เนื่องจากต้องใช้ร่วมกับไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 (Timer 2) โดยรีจิส

เตอร์แคปเจอร์นี้มีชื่อเรียกอย่างย่อว่า รีจิสเตอร์ RCAP2 ซึ่งแบ่งออกเป็นไบต์ต่ำคือ RCAP2L มีแอดเดรสอยู่ที่ 0CAH และไบต์สูงคือ RCAP2H มีแอดเดรสอยู่ที่ 0CBH

รีจิสเตอร์แคปเจอร์จะถูกใช้งานเมื่อกำหนดให้ไทมเมอร์ 2 ทำงานในโหมดแคปเจอร์ ซึ่งเป็นโหมดที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสถานะทางลอจิกที่ขา T2EX ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์ในการวัดคาบเวลา ความถี่ และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณพัลส์ที่ขา T2EX

รีจิสเตอร์ควบคุม (Control register)

รีจิสเตอร์ PCON เป็นรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลของวงจรถูกส่งสารอนุกรมและกำหนดการทำงานในโหมดประหยัดพลังงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลช

รีจิสเตอร์ SCON เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจรถูกส่งสารอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลช

รีจิสเตอร์ TCON และ T2CON เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลช โดย T2CON ใช้สำหรับไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลชเบอร์ AT89C52 และในอนุกรม AT89Sxx

รีจิสเตอร์ TMOD และ T2MOD เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้กำหนดโหมดหรือลักษณะในการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลช โดย T2MOD ใช้สำหรับไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลชเบอร์ AT89C52 และในอนุกรม AT89Sxx

รีจิสเตอร์ IE และ IP เป็นรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองการอินเทอร์รัปต์ (interrupt: การขัดจังหวะการทำงานปกติของซีพียู) โดย IE เป็นรีจิสเตอร์สำหรับเอ็นเอเบิลหรือใช้ในการกำหนดลักษณะของการตอบสนองการอินเทอร์รัปต์ ในขณะที่ IP เป็นรีจิสเตอร์สำหรับกำหนดลำดับความสำคัญของการตอบสนองการอินเทอร์รัปต์ว่า จะให้ซีพียูตอบสนองการเกิดอินเทอร์รัปต์ในลักษณะใดก่อนหรือหลัง

รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

ในการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51 แบบเฟลช มีรีจิสเตอร์ที่ต้องเกี่ยวข้องเป็นพื้นฐานอยู่ 5 ตัว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

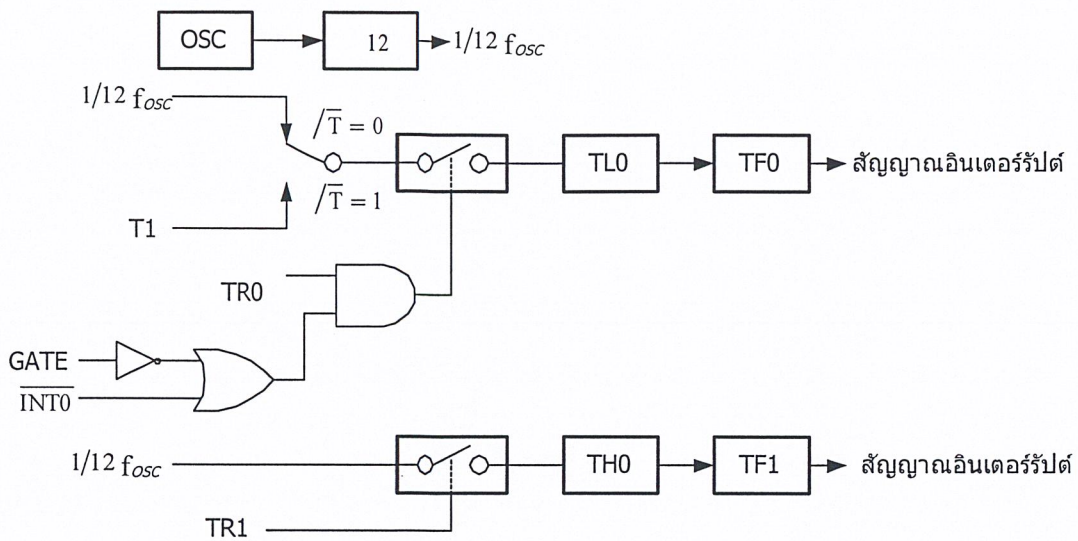
รีจิสเตอร์ไทมเมอร์

มีด้วยกัน 2 ตัวคือ TL2 มีแอดเดรสอยู่ที่ CCH และ TH2 มีแอดเดรสอยู่ที่ CDH รีจิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะอยู่ในพื้นที่ ของรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษหรือ SFR รีจิสเตอร์แต่ละตัวมีขนาด 8 บิต แต่ในการใช้งานโดยทั่วไปมักใช้ รวมกันเป็นรีจิสเตอร์ไทมเมอร์ 2 ขนาด 16 บิต โดยใน TL2 จะเก็บข้อมูล 8 บิตล่าง ส่วน TH2 เก็บข้อมูล 8 บิตบน รีจิสเตอร์ไทมเมอร์ทั้งคู่เมื่อนำมาใช้งานร่วมกันจะสามารถเก็บค่าของการนับได้สูงสุด 65,536 ค่า หรือ FFFFH เมื่อนับถึงค่านี้อีกก็จะวนไปเริ่มนับ 0000H ใหม่ และเมื่อเกิดการนับรอบใหม่ จะมีการเซตบิต TF2 ในรีจิสเตอร์ T2CON ที่ใช้ควบคุมการทำงานของไทมเมอร์ เพื่อแจ้งให้ทราบว่าเกิดการนับเกินค่าสูงสุด

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 หรือ

T2CON (Timer/ Counter 2 Control Register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ C8H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ SFR สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิตมีรายละเอียดการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.21 ไคอะแกรมการทำงานในโหมด 3 ของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
TF2	EXF2	RCLK	TCLK	EXEN2	TR2	$\overline{T2}$	$\overline{P/RL2}$

รูปที่ 2.22 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ T2CON

TF2 (Timer 2 overflow flag) : จะเซตเมื่อดำของรีจิสเตอร์ Timer 2 เกิดการนับเกินหรือเกิดโอเวอร์โฟลวการเคลียร์บิตนี้ทำได้ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ และถ้าไม่เกิดการเซตถ้าบิต RCLK หรือบิต TCLK เป็น “1”

EXF2 (Timer 2 external flag) : จะเกิดการเซตเมื่อเกิดการแคปเจอร์หรือรีโพลด์ขึ้น ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจาก “1” เป็น “0” ที่ขาอินพุต T2CX (ขา P1.1) และบิต EXEN 2 เป็น “1” ในกรณีที่อินเทอร์รัปต์ในไทเมอร์ 2 ได้รับการเอ็นเอเบิล และบิต EXF2 นี้เกิดเซต จะมีผลทำให้ซีพียู ไปอ่านค่าเวกเตอร์ของการบริการอินเทอร์รัปต์ บิตนี้สามารถเคลียร์ด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์เท่านั้น

RCLK (Receiver clock flag) : ถ้าบิตนี้เกิดการเซตทำให้วงจรถอดอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้พัลส์โอเวอร์โฟลวของไทเมอร์ 2 เป็นสัญญาณนาฬิกาในการรับข้อมูลในโหมด 1 และ 3 ถ้าหากบิตนี้เป็น “0” จะให้พัลส์จากไทเมอร์ 1

TCLK (Transmit clock flag) : ถ้าบิตนี้เกิดการเซตทำให้วงจรถอดอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้พัลส์โอเวอร์โฟลวของไทเมอร์ 2 เป็นสัญญาณนาฬิกาในการส่งข้อมูลในโหมด 1 และโหมด 3 ถ้าหากบิตนี้เป็น “0” จะใช้พัลส์จากไทเมอร์ 1

EXEN2 (Timer 2 external enable flag) : เมื่อบิตนี้เซตเป็น “1” จะเป็นการเอ็นเอเบิลการแคปเจอร์หรือรีโพลด์ที่ขา T2EX ให้เกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขว่า ไทเมอร์ 2 ต้องไม่ถูกนำไปใช้ในการสื่อสารพอร์ตอนุกรมหรือบิต RCLK หรือ TCLK เป็น “1” ถ้าบิตนี้เป็น “0” ไทเมอร์ 2 จะไม่สนใจเหตุการณ์ที่ขา T2EX

TR2 : บิตนี้จะใช้ในการควบคุมการเริ่มต้นและหยุดการทำงานของไทมเมอร์ 2 เป็นการควบคุมทางซอฟต์แวร์

“0” หยุดการทำงานของไทมเมอร์ 2 (STOP)

“1” เริ่มต้นการทำงานของไทมเมอร์ 2 (START)

\overline{T} (Timer or counter selector) : ใช้เลือกลักษณะการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

“0” เลือกให้ทำงานเป็นไทมเมอร์ โดยใช้สัญญาณอินพุตจากสัญญาณนาฬิกาภายในไมโครคอนโทรลเลอร์

“1” เลือกให้ทำงานเป็นเคาน์เตอร์ โดยรับสัญญาณอินพุตทางขา T2 (P1.0)

CP/RL2 (Capture/Reload flag) : เป็นบิตแสดงสถานะการทำงานของไทมเมอร์ 2

“0” มีการรีโหลดค่าของการนับแบบอัตโนมัติเกิดขึ้นเมื่อไทมเมอร์ 2 เกิดโอเวอร์โฟลวหรือเกิดการเปลี่ยนระดับลอจิกแบบลบ (เปลี่ยนจาก “1” เป็น “0”) ที่ขา T2EX ในกรณีที่บิต EXEN2 เป็น “1” แต่ถ้าหากบิต RCLK หรือ TCLK เป็น “1” จะยอมให้มีการรีโหลดแบบอัตโนมัติเกิดขึ้นเมื่อไทมเมอร์ 2 เกิดโอเวอร์โฟลวเท่านั้น

“1” แสดงว่ามีการแคปเจอร์เกิดขึ้น เมื่อเกิดการเปลี่ยนระดับลอจิกแบบลบ ที่ขา T2EX ในกรณีที่บิต EXEN2 เป็น “1”

รีจิสเตอร์เลือกโหมดการทำงานของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 หรือ

T2MOD (Timer/Counter 2 Mode Control Register)

เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิตมีแอดเดรสอยู่ C9H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ SFR ไม่สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต มีบิตสำหรับกำหนดการทำงานเพียง 2 บิตคือ

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0
-	-	-	-	-	-	T2OE	DCEN

รูปที่ 2.23 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ T2MOD

T2OE (Timer 2 Output Enable bit) : ใช้เอ็นเอเบิลเอาต์พุตของไทมเมอร์ 2

“0” ดิสเอเบิล

“1” เอ็นเอเบิล

DCEN (Timer 2 Counter Enable bit) : กำหนดให้ไทมเมอร์ 2 ทำงานเป็นตัวนับหรือเคาน์เตอร์แบบขึ้นและลง

“0” ดิสเอเบิล

“1” เอ็นเอเบิลให้ทำงานเป็นตัวนับหรือเคาน์เตอร์แบบขึ้นลง

โหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 สามารถเลือกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด โดยการกำหนดที่บิต RCLK+TCLK CP/RL2 และ TR2 ในรีจิสเตอร์ T2CON ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.3 โหมดการทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2 ได้แก่ โหมดแคปเจอร์หรือตรวจจับสัญญาณ, โหมดตั้งค่าการนับอัตโนมัติ และโหมดกำเนิดอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมหรืออัตราบอด (baud rate generator) ต่อไปจะอธิบายการทำงานในแต่ละโหมดของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

RCLK+TCLK	CP/RL2	TR2	โหมด
0	0	1	16บิตแบบตั้งค่าการนับอัตโนมัติ หรือรีโหลด
0	1	1	แคปเจอร์หรือตรวจจับสัญญาณ
1	X	1	กำหนดอัตราบอด
X	X	0	ดิสเอเบิล

ตารางที่ 2.3 การเลือกโหมดทำงานของไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

การทำงานในโหมดแคปเจอร์หรือตรวจจับสัญญาณ

การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อกำหนดให้บิต EXEN2 เป็น “1” หลังจาก que เลือกให้ไทเมอร์ 2 ทำงานในโหมดแคปเจอร์แล้วเลือกให้ทำงานในโหมดนี้ขาอินพุตที่ทำการตรวจจับคือขาอินพุต T2EX ซึ่งตรงกับขา P1.1 ที่ขา T2EX จะมีวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของระดับลอจิกจาก “1” เป็น “0” รีจิสเตอร์ TL2 และ TH2 จะทำการนับค่าเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าที่ขา T2EX จะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อตรวจจับได้ค่าของรีจิสเตอร์ TL2 และ TH2 จะถูกส่งต่อไปยังรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H พร้อมกันนั้นยังทำการเซตบิต EXF2 ให้เป็น “1” เพื่อสร้างสัญญาณอินเตอร์รัปต์ให้เกิดขึ้น ในรูป 2.24 แสดงการทำงานของไทเมอร์ 2 ในโหมดแคปเจอร์นี้

การทำงานในโหมดตั้งค่าการนับอัตโนมัติ

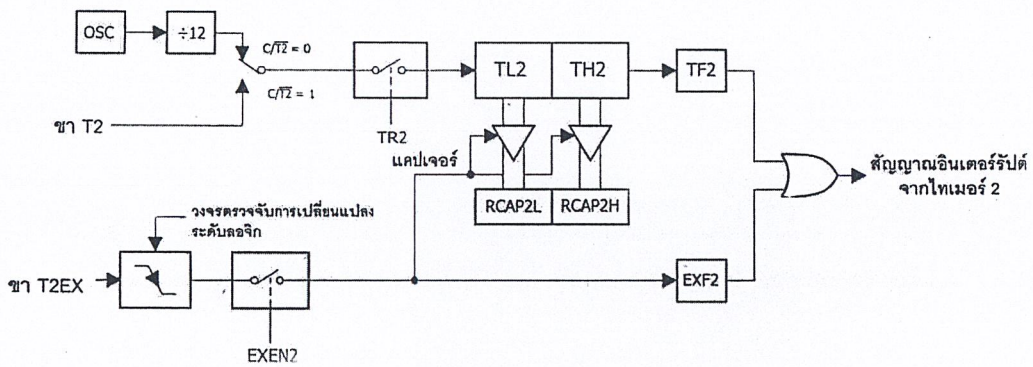
การทำงานในโหมดนี้ การกำหนดสถานะที่บิต EXEN2 จะทำให้เกิดการทำงานใน 2 ลักษณะคือ ถ้าบิต EXEN2 เป็น “0” เมื่อไทเมอร์ 2 ทำการนับค่าเกินรอบแล้ว จะเกิดการเซตบิต TF2 และจะทำการเรียกค่าการนับใหม่จากรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H โดยอัตโนมัติ การกำหนดค่าของรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H สามารถกระทำได้ด้วยการะบวนทางซอฟต์แวร์

ในกรณีที่บิต EXEN2 เป็น “1” หลังจาก que เลือกให้ไทเมอร์ 2 จะทำการนับเหมือนเดิม แต่เงื่อนไขของการตั้งค่าการนับใหม่โดยอัตโนมัติจากรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H จะใช้การเปลี่ยนแปลงของ

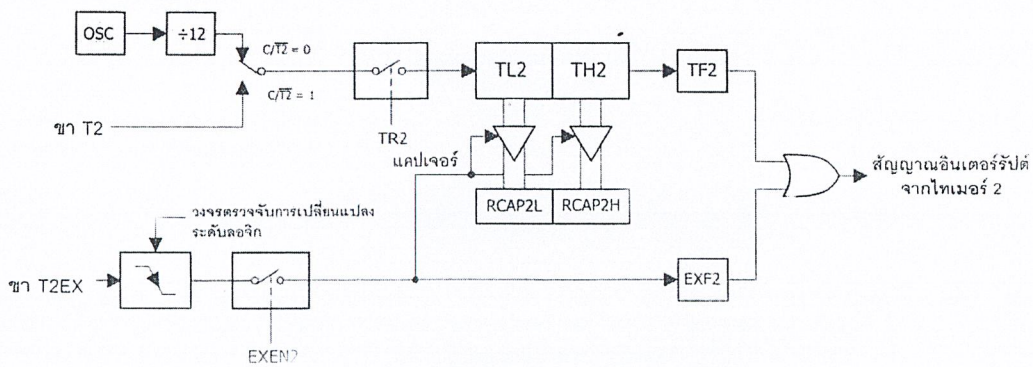
ระดับลอจิกจาก “1” เป็น “0” ที่ T2EX เป็นตัวกำหนด และทารเซตบิต EXF2 เพื่อสร้างสัญญาณอินเทอร์รัปต์แทนบิต TF2 ในรูปที่ 2.25 แสดงไดอะแกรมการทำงานของไทมเมอร์ 2 ในโหมดตั้งค่าการนับอัตโนมัติ การทำงานในโหมดกำเนิดอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมหรืออัตราบอด

การทำงานในโหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทำการเซตบิต RCLK และ/หรือ TCLK ในรีจิสเตอร์ T2CON ให้เป็น “1” เมื่อเข้าสู่การทำงานในโหมดนี้ บิต TF2 จะไม่เกิดการเซต และไม่มีการสร้างสัญญาณอินเทอร์รัปต์ แต่การอินเทอร์รัปต์ในไทมเมอร์ 2 ก็ไม่ได้ถูกดีสเอเบิล เมื่ออยู่ในโหมดนี้ บิต EXEN2 ถูกเซต การเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจาก “1” เป็น “0” ที่ขา T2EX จะส่งผลให้บิต EXEN2 เกิดการเซต แต่จะไม่มีค่าจากรีจิสเตอร์ RCAP2L และ RCAP2H เมื่อเป็นเช่นนั้นขา T2EX จึงสามารถใช้เป็นขาอินพุตสำหรับการอินเทอร์รัปต์ได้ เป็นกรณีพิเศษ

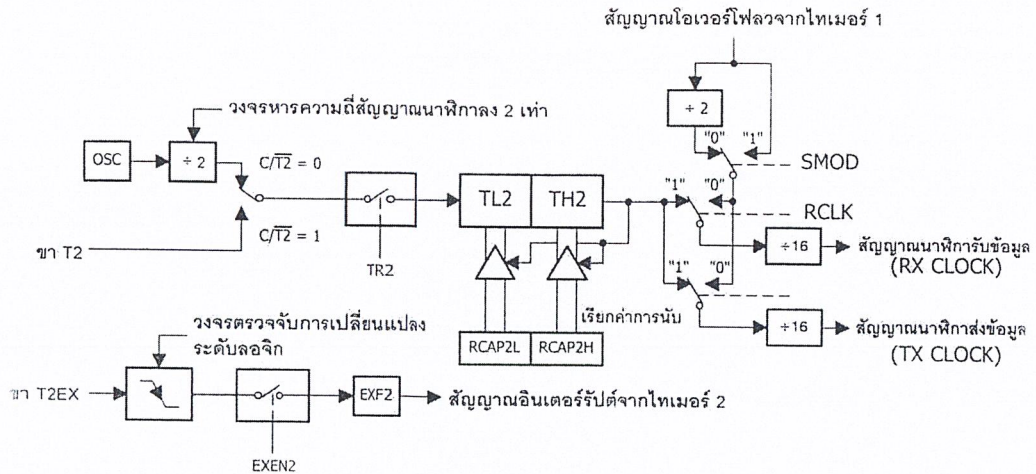
เมื่อไทมเมอร์ 2 ทำงาน (บิต TR2 เป็น “1”) จะถูกกำหนดให้ทำงานเป็นไทมเมอร์ จึงไม่สามารถอ่านหรือเขียนค่ารีจิสเตอร์ TL2 และ TH2 ได้ ค่าของรีจิสเตอร์ไทมเมอร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สเตต (1 สเตตเท่ากับ 2 คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกา) ค่าการนับของรีจิสเตอร์นำมาใช้สร้างสัญญาณนาฬิกาของการสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ในรูปที่ 2.2 แสดงการทำงานของไทมเมอร์ 2 ในการกำหนดอัตราบอด



รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมการทำงานในโหมดแคปเจอร์ของไทมเมอร์/เคาร์เตอร์ 2



รูปที่ 2.25 ไดอะแกรมการทำงานในโหมดตั้งค่าการนับอัตโนมัติของไทมเมอร์/เคาร์เตอร์ 2



รูปที่ 2.26 ไตอะแกรมการทำงานในโหมดค่านับอัตราבודในการสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ 2

วอตช์ดีอกไทมเมอร์ (Watchdog Timer : WDT)

นอกเหนือไปจากไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ทั้งสามตัวแล้ว สำหรับในอนุกรม AT89Sxx ไม่ว่าจะเป็ นเบอร์ AT89S8252 AT89LS8252 และเบอร์ AT89S53 ยังมีวงจรไทมเมอร์อีกแบบหนึ่งเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถนำ ไปใช้สร้างสัญญาณรีเซตในกรณีที่ชิพหยุดทำงานในไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดภาวะหยุดทำงานกะทันหันหรือ แสงก์ (hang) นั่นคือ วอตช์ดีอกไทมเมอร์ (Watchdog Timer:WDT) โดยวอตช์ดีอกไทมเมอร์ใน ไมโคร คอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชอนุกรม AT89Sxx จะเป็นวอตช์ดีอกไทมเมอร์แบบโปรแกรมได้ โดยการ กำหนดค่าของบิต PSO-PS2 ในรีจิสเตอร์ WMCON สำหรับเบอร์ AT89S8252 และรีจิสเตอร์ WCON สำหรับเบอร์ AT89S53

วอตช์ดีอกไทมเมอร์จะได้รับการดีสเอเบิล โดยฮาร์ดแวร์เมื่อเริ่มต้นจ่ายไฟหรือเมื่อเกิดเพาเวอร์ออ นรีเซต และเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่การทำงานในโหมดประหยัดพลังงานแบบลดพลังงานหรือเพาเวอร์ ดาวน์ สำหรับการเอนเอเบิลสามารถกระทำได้โดยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ โดยการเซตบิต WDTEW ในรี จิสเตอร์ WMCON สำหรับเบอร์ AT89S8252 และรีจิสเตอร์ WCON สำหรับเบอร์ AT89S53

การทำงานของวอตช์ดีอกไทมเมอร์จะเริ่มขึ้นเมื่อมีการกำหนดคาบเวลาในการทำงานของ วอตช์ดีอกไทมเมอร์และมีการเอนเอเบิลให้วอตช์ไทมเมอร์เริ่มทำงาน วงจรนับภายในวอตช์ไทมเมอร์จะนับค่า เวลาไปตามปกติ หากชิพทำงานอยู่เป็นปกติจะมีการส่งสัญญาณมารีเซตหรือเคลียร์ค่าในวอตช์ดีอกไทมเมอร์อยู่ เป็นระยะๆ เพื่อไม่ให้วอตช์ไทมเมอร์ทำงานจนถึงค่าเวลาที่กำหนดหรือเกิดการไทม์เอาต์ (time out) ขึ้น แต่หาก ชิพหยุดทำงานกะทันหัน ไม่ว่าจะด้วยสาเหตุใด ยกเว้นการรีเซตและการเข้าสู่ โหมดประหยัดพลัง งานแบบลดพลังงานหรือเพาเวอร์ดาวน์ ก็จะไม่มีการส่งสัญญาณมารีเซตหรือเคลียร์ค่าในวอตช์ดีอกไทมเมอร์ทำให้ใน ที่สุดวอตช์ดีอกไทมเมอร์ก็จะทำงานถึงค่าเวลาที่กำหนด เกิดการไทม์เอาต์ วอตช์ดีอกไทมเมอร์ก็จะทำการสร้าง สัญญาณรีเซตส่งไปยังชิพ เพื่อทำการรีเซตชิพ ส่งผลให้ชิพสามารถกลับเริ่มต้นทำงานใหม่ได้อีกครั้ง โดย ไม่จำเป็นต้องทำการรีเซตชิพจากภายนอกหรือจ่ายไฟเลี้ยงใหม่ให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เบอร์พื้นฐานเช่น 8031 8032 8051 หรือแบบแฟลชเบอร์ AT89C51 AT89C52 AT89C55 จะไม่มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์อยู่ภายใน เมื่อมีความจำเป็นต้องตรวจสอบการทำงานของซีพียูจึงต้องใช้เทคนิคในการเขียนโปรแกรมเข้าช่วย โดยการใช้ไทมเมอร์ที่มีอยู่ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์พื้นฐานเหล่านั้น หรือใช้ไอซีที่ทำงานเป็นวงจรวอตช์ด็อกโดยเฉพาะต่อเข้ากับขา RST ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างสัญญาณรีเซ็ตขึ้น ในกรณีที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดภาวะหยุดทำงานกระทันหันโดยไม่ทราบสาเหตุ

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์ (Watchdog & Memory Control register : WMCON และ Watchdog control register : WCON)

ในการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชอนุกรม AT89Sxx มีรีจิสเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน 1 ตัว คือ WMCON สำหรับเบอร์ AT89S8252 และรีจิสเตอร์ WCON สำหรับเบอร์ AT89S53 โดยมีหน้าที่ในการทำงานหลักเหมือนกันทุกประการ ส่วนแตกต่างกันมีเพียงจุดเดียวคือ ในเบอร์ AT89S8252 มีหน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรอมอยู่ จึงต้องมีการควบคุมการทำงานเพิ่มเติมเข้ามา จึงใช้บิต 3 และ 4 ในรีจิสเตอร์ WCON มาจัดการหน่วยความจำข้อมูลส่วนนี้ สำหรับบิตอื่น ๆ จะเหมือนกันทุกประการดังนั้นในการอธิบายรายละเอียดของรีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์จะอธิบายไปในคราวเดียวกัน โดยจะเพิ่มเติมรายละเอียดของบิตที่ใช้ควบคุมหน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรอมเข้าไปด้วย รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์ทั้ง WMCON และ WCON เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต มีแอดเดรสอยู่ที่ 96H ในพื้นที่ของรีจิสเตอร์ SER สามารถเข้าถึงได้ในระดับบิต มีรายละเอียดดังนี้

บิต 7	บิต 6	บิต 5	บิต 4	บิต 3	บิต 2	บิต 1	บิต 0	
PS2	PS1	PS0	EEMWE	EEMEN	DSP	WDTRST	WDTEN	AT89S8252
PS2	PS1	PS0	-	-	DSP	WDTRST	WDTEN	AT89S53

รูปที่ 2.27 แสดงรายละเอียดรีจิสเตอร์ WMCON และ WCON

PS2-PS0(Prescaler bits) : ใช้ในการเลือกค่าเวลาให้แก่วอตช์ด็อกไทมเมอร์ มีรายละเอียดดังนี้

บิตปริสเกลเลอร์			ค่าเวลาของ วอตช์ด็อกไทเมอร์
PS2	PS1	PS0	
0	0	0	16 ms
0	0	1	32 ms
0	1	0	64 ms
0	1	1	128 ms
1	0	0	256 ms
1	0	1	512 ms
1	1	0	1,024 ms
1	1	1	2,048 ms

ตารางที่ 2.4 แสดงการเลือกค่าเวลาของวอตช์ด็อกไทเมอร์

EEMWE (EEPROM Data Memory Write Enable bit) :

บิตนี้เป็นบิต 4 ของรีจิสเตอร์ WMCON ใช้ในการเอ็นเอเบิลการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำข้อมูลแบบอีพროมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89S8252 เมื่อต้องการเขียนข้อมูลต้องทำการเซตบิตนี้ก่อน หลังจากการเขียนข้อมูลเสร็จสิ้นลง ต้องการทำการเคลียร์บิตนี้เสมอสำหรับในรีจิสเตอร์ WCON ในไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S53 บิตนี้จะไม่มีการใช้งานต้องกำหนดให้เป็น “0”

EEMEN (Internal EEPROM Access Enable bit) :

บิตนี้เป็นบิต 3 ของรีจิสเตอร์ WMCON ใช้ในการเอ็นเอเบิลการเข้าถึงหน่วยความจำข้อมูลแบบอีพโรมภายใน AT89S8252 แทนที่จะใช้หน่วยความจำข้อมูลภายนอก เมื่อต้องการเข้าถึงข้อมูลในหน่วยความจำส่วนนี้ โดยใช้คำสั่ง MOVX และรีจิสเตอร์ DPTR ต้องทำการเซตบิตนี้ก่อน ถ้าหากบิตนี้เป็น “0” จะเป็นการกำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้คำสั่ง MOVX และรีจิสเตอร์ DPTR ติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับในรีจิสเตอร์ WCON ของ AT89S53 บิตนี้ไม่ใช้งาน กำหนดให้เป็น “0”

DPS (Data Pointer Register Select) :

เนื่องจากในไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรม AT89Sxx จะมีรีจิสเตอร์ สำหรับชี้ข้อมูลหรือ DPTR 2 ตัวคือ DPTR0 และ DPTR1 บิตนี้จึงมีหน้าที่ใช้ในการเลือกรีจิสเตอร์ DPTR ถ้าเป็น “0” จะเป็นการเลือกรีจิสเตอร์ DPTR0 (ซึ่งก็คือ DPOL และ DPOH) ในกรณีที่บิตนี้เป็น “1” จะเป็นการเลือกรีจิสเตอร์ DPTR1 (ซึ่งก็คือ DPIL และ DPIH)

WDTRST/RDY/BSY (Watchdog Timer Reset and EEPROM Ready/Bus flag) :

บิตนี้มีความเกี่ยวข้องกับการทำงาน 2 ส่วนคือ การรีเซตของวอตช์ด็อกไทเมอร์และใช้เป็นบิตแสดงสถานะของหน่วยความจำข้อมูลอีพโรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89S8252 ในกรณีของวอตช์ด็อกไทเมอร์ บิตนี้จะเซตโดยผู้ใช้งานด้วยกระบวนการทางซอฟต์แวร์ เป็นการตั้งให้วอตช์ด็อกไทเมอร์สร้างสัญญาณรีเซตส่งออกไปในกรณีที่วอตช์ด็อกไทเมอร์เกิดไทม์เอาต์ หลังจากที่ส่งสัญญาณรีเซตออกไปแล้ว บิต

นี้จะเคลียร์ตัวเองเป็น “0” โดยอัตโนมัติในไซเกิลของการทำงานถัดไป ดังนั้นบิตนี้จึงเขียนได้เพียงอย่างเดียว (write-only)

ในกรณีของหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม จะใช้บิตนี้ในการป้องกันการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำถ้าบิตเป็น “1” หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอมจะสามารถอ่านได้เพียงอย่างเดียว เมื่อมีความต้องการเขียนข้อมูลหลังจากเอ็นเอเบิลการเขียนที่บิต EEMWE แล้ว ให้ทำการเคลียร์บิตนี้เป็น “0” หลังจากทำการเขียนข้อมูลเสร็จสิ้นลง บิตนี้จะเซตเป็น “1” โดยอัตโนมัติเป็นการแจ้งให้ทราบว่า การเขียนข้อมูลเสร็จสิ้นลงแล้ว

สำหรับใน AT89S53 ใช้งานบิตนี้ในการสร้างสัญญาณรีเซตของวอตช์ด็อกไทมเมอร์เท่านั้น

WDTEN (Wathdog Timer Enable bit) : ใช้ในเอ็นเอเบิลการทำงานของวอตช์ด็อกไทมเมอร์

“0” คัสเอเบิลวอตช์ด็อกไทมเมอร์

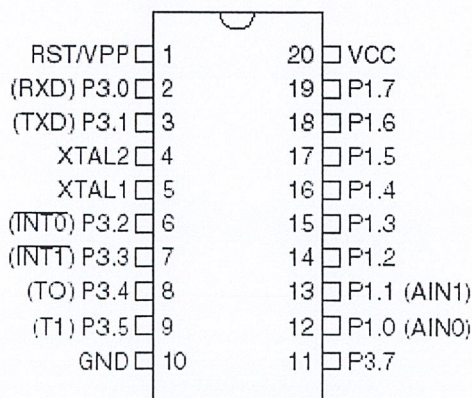
“1” เอ็นเอเบิลวอตช์ด็อกไทมเมอร์

จากรายละเอียดของไทมเมอร์/เคาน์เตอร์ทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ในการสร้างระบบควบคุมที่ดี ไทมเมอร์/เคาน์เตอร์เป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นต้องมี ไม่ว่าจะเป็นการสร้างอัตราบิตสำหรับการสื่อสารข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ หรือเพื่อสร้างฐานเวลา และยังสามารถใช้ในการวัดคาบเวลาและความถี่ของสัญญาณได้อีกด้วย นอกเหนือจากนั้นในไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรม 89Sxx ที่มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์ในตัวนั้นยังช่วยให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น การมีวอตช์ด็อกไทมเมอร์ในตัวจัดได้ว่าเป็นคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ไปแล้วจึงส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 มีขีดความสามารถที่ทัดเทียมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในยุคใหม่ และยังคงเป็นที่นิยมใช้งานกันต่อไป

AT89C2051

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาด 20 ขา ทำงานที่แรงดันต่ำเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาด 8 bit มีหน่วยความจำแบบ Flash memory ขนาด 2 กิโลไบต์ สามารถเขียนและลบโปรแกรมได้ 1,000 ครั้ง หลักการทำงานไม่คล้ายกับเบอร์อื่น ๆ ในตระกูลเดียวกัน

PDIP/SOIC



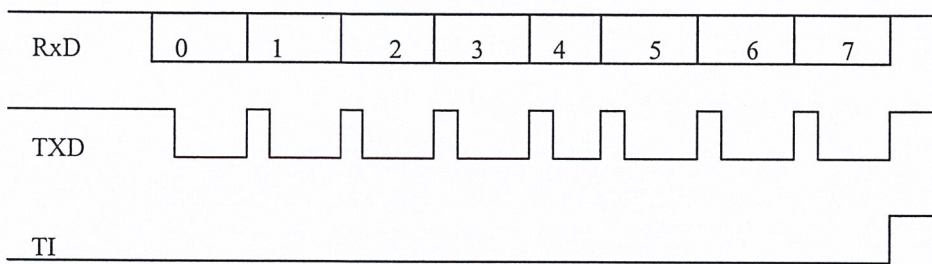
รูปที่ 2.28 แสดงตำแหน่งขาของ AT89C2051

2.3 การรับส่งข้อมูลอนุกรม (UART) ของ AT89S8252

พอร์ตสื่อสารอนุกรมของ 8051, 8052 มีโครงสร้างการทำงานในแบบที่เรียกว่าฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex) ในการรับและส่งข้อมูลอนุกรมได้ในเวลาเดียวกัน โดยทางด้านส่งใช้ขา TxD (พอร์ต 3.1) ทางด้านรับใช้ ขา RxD (พอร์ต 3.0) SBUF ใช้เป็นบัฟเฟอร์สำหรับรับและส่งข้อมูลอนุกรม

พอร์ตสื่อสารอนุกรมของ 8051 สามารถโปรแกรมการทำงานได้หลายโหมดด้วยกัน โดยเลือกที่ บิต SM1 และ SM0 ซึ่งอยู่ในรีจิสเตอร์ควบคุม SCON การทำงานทั้ง 4 โหมด ของพอร์ตสื่อสารอนุกรมดังนี้

โหมด 0 : พอร์ตสื่อสารอนุกรม 8 บิต โดยการส่งจะเลื่อนออกทีละบิตโดยส่งบิต DO ออกไปก่อนทางขา RxD และไม่มีการส่ง start bit แต่จะส่ง shift clock ทางขา TxD (ความเร็ว 1/12 เท่าของ CPU Clock)



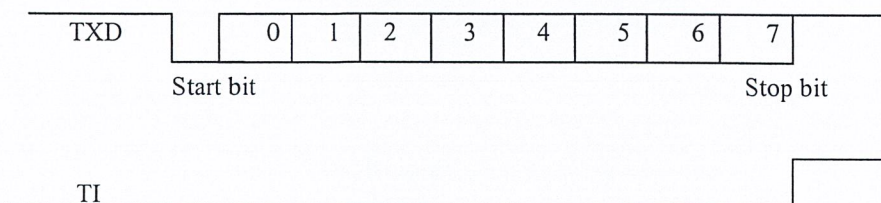
โหมด 1 : พอร์ตสื่อสารอนุกรม 10 บิต ข้อมูล 8 บิต 1 start bit และ 1 stop bit และสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วในการส่งข้อมูลได้ โดยขึ้นกับบิต SMOD ใน PCON และอัตราโอเวอร์โพล์ของ Timer 1

$$\text{Baud Rate Mode 1} = \frac{k \times \text{OscillatorFreq.}}{32 \times 12 \times [256 - (TH1)]} \quad \text{สำหรับ 8031, 8051}$$

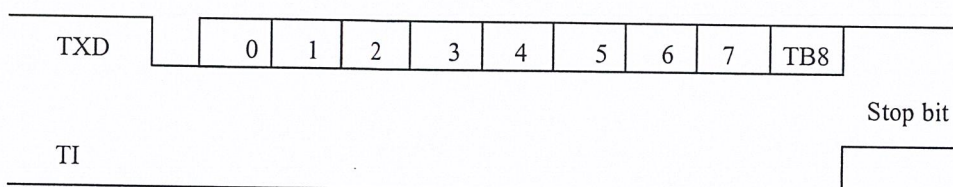
โดยใช้ Timer 1

$$\text{Baud Rate Mode 1} = \frac{\text{OscillatorFreq.}}{32 \times [65536 - (RCCAP2H, RCAP2L)]}$$

สำหรับ 8032, 8052
โดยใช้ Timer 2



- โหมด 2 : พอร์ตสื่อสารอนุกรม 11 บิต ข้อมูล 9 บิต 1 start bit และ 1 stop bit (TB8 นิยมนำมาใช้ส่ง Parity bit)
 ความเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 1/32 และ 1/64 ของ CPU Clock โดยขึ้นกับบิต SMOD ใน PCON)
 $Baud\ Rate\ Mode\ 2 = (OSC\ Frequency)/32$ เมื่อ SMOD = 1
 $Baud\ Rate\ Mode\ 2 = (OSC\ Frequency)/64$ เมื่อ SMOD = 0



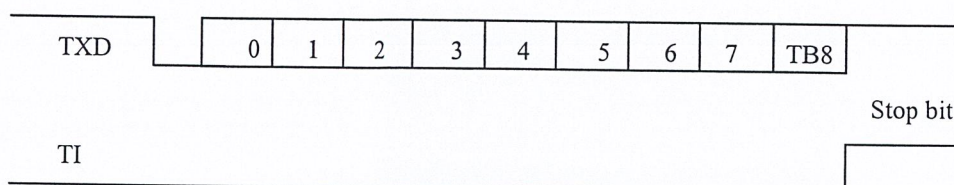
- โหมด 3 : พอร์ตสื่อสารอนุกรมแบบ 11 bit UART โดยส่งข้อมูล 9 บิต 1 Start bit และ 1 stop bit เหมือนโหมด 2 ยกเว้นอัตราความเร็วจะขึ้นกับบิต SMOD ในPCON และอัตราโอเวอร์โพล์ของ Timer 1 สำหรับ 8051 หรือขึ้นกับ อัตราโอเวอร์โพล์ของ Timer 2 สำหรับ 80C154D

$$Baud\ Rate\ Mode\ 3 = \frac{K \times Oscillator\ Freq.}{32 \times 12 \times [256 - (TH1)]} \quad \text{สำหรับ } 8031, 8051$$

โดยใช้ Timer 1

$$Baud\ Rate\ Mode\ 3 = \frac{Oscillator\ Freq.}{32 \times [65536 - (RCAP2H, RCAP2L)]}$$

สำหรับ 8032, 8052
80154, 80154D โดยใช้
Timer 2

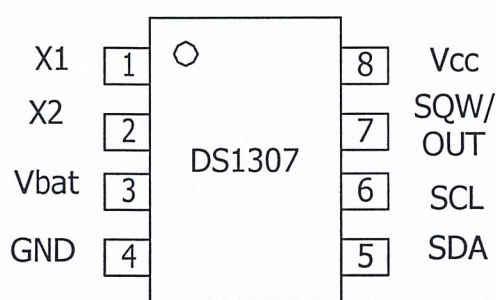


2.4 DS1307 ไอซีสร้างฐานเวลาจริงหรือรีลไทม์คล็อก (RTC)

ผู้ผลิตคือ คัลลัสเซมิคอนดักเตอร์ (Dallas semiconductor) มีหน้าที่สร้างฐานเวลาจริงให้แก่ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย DS1307 จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับเวลาทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นค่าของเวลาที่ละเอียดถึง

หลักวินาที, นาที, ชั่วโมง, วันที่ (date), วันในสัปดาห์ (day), เดือน และปี โดยสามารถปรับวันเดือนปีให้ตรงตามปฏิทินได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการกำหนดวันในปีอธิกสุรทินด้วย คุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญดังนี้

- เป็นไอซีรีลไทม์คล็อกให้ข้อมูลตั้งแต่วันที่จนถึงปี รวมถึงการปรับวันในปีอธิกสุรทินด้วย สามารถให้ข้อมูลเวลาได้อย่างเที่ยงตรงถึงปีคริสตศักราช 2100
- มีหน่วยความจำอนโวลตาไมล์แรม 56 ไบต์อยู่ภายใน สามารถใช้เก็บข้อมูลทั่วไปได้
- ใช้การเชื่อมต่อแบบระบบ I²C
- มีวงจรตรวจจับไฟเลี้ยงต่ำหรือหายไปอย่างอัตโนมัติ และสามารถรักษาข้อมูลเวลาไว้ได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยงไอซี



รูปที่ 2.29 การจัดหาไอซี DS1307

รายละเอียดการใช้งานของ DS1307

ในรูปที่ 2.29 แสดงการจัดขาของ DS 1307 แต่ละขามีหน้าที่และการใช้งานดังนี้

Vcc, GND (ขา 8,4) ต่อกับไฟเลี้ยง +5V

V_{BAT} (ขา 3) ใช้ต่อกับแบตเตอรี่ 3 V เพื่อรักษาการทำงานของวงจรสร้างฐานเวลาของ DS1307 ให้คงอยู่ต่อไป แม้ว่าไม่มีไฟเลี้ยงจ่ายให้แก่ DS 1307 ชนิดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมคือ แบตเตอรี่แบบลิเทียม ซึ่งมีความจุ 40 mAh หรือมากกว่า จะสามารถรักษาข้อมูลได้นาน 10 ปีที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

SDA, SCL (ขา 5 และ 6) เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบบัส I²C

SQW OUT (ขา 7) ที่ขานี้จะมีสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมส่งออกมา โดยสามารถเลือกความถี่ได้ 1Hz, 4.096 kHz, 8.192 kHz และ 32 kHz ในการใช้งานต้องต่อตัวต้านทาน 1k พูลอัพที่ขานี้ด้วย

X1, X2 (ขา 1 และ 2) ใช้ต่อกับคริสตอลความถี่มาตรฐาน 32.768 kHz เพื่อใช้เป็นฐานเวลาในการสร้างค่าเวลาจริง ในการใช้งานต้องต่อคริสตอลเข้ากับขาทั้งสองนี้และที่แต่ละขาต้องต่อตัวเก็บประจุค่าต่ำ ๆ ประมาณ 15 pF ครอบงับขากราวด์ด้วย

การทำงานของ DS1307

ไอซี DS1307 จัดการเชื่อมต่อในแบบบัส I²C โดยจะทำงานเป็นอุปกรณ์สเลฟเสมอ ดังนั้นการติดต่อเพื่อใช้งานจึงต้องกำหนดรูปแบบตามที่กำหนดไว้ใน การติดต่อแบบ I²C วงจรออสซิลเลเตอร์ถือเป็นหัว

ใจหลักของไอซี เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างข้อมูลเวลาจริง ในขณะที่ DS1307 ทำงานที่ขา SQW/OUT จะมีสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมส่งออกมาตลอดเวลาในกรณีที่มีการอินาเบิลวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่ รีจิสเตอร์ควบคุม ค่าความถี่ของสัญญาณนี้สามารถเลือกได้ 4 ค่า คือ 1 Hz, 4.096 kHz, 8.192 kHz และ 32 kHz พร้อมกันนั้นก็จะมีการเก็บค่าของเวลาไว้ในหน่วยความจำอนโวลตาไทล์แรม ซึ่งมีขนาดรวม 64 ไบต์ แต่จัดสรรให้ใช้เก็บข้อมูลเวลา 8 ไบต์ และเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไปสำหรับผู้ใช้งานอีก 56 ไบต์

วงจรควบคุมพลังงานไฟฟ้าจะคอยตรวจสอบสถานะของไฟเลี้ยงไอซี หากไฟเลี้ยงต่ำกว่า $1.25 \times V_{BAT}$ ก็จะควบคุมให้ DS1307 หยุดการทำงานรีเซตค่าตัวนับแอดเดรสภายใน ทำให้ไม่สามารถติดต่อกับ DS1307 ได้ ดังนั้น ในการใช้งาน DS1307 ต้องระมัดระวังอย่าให้ไฟเลี้ยงตกต่ำกว่า $1.25 \times V_{BAT}$ หรือประมาณ 3.75 V ในกรณีที่ใช้ V_{BAT} เท่ากับ 3V ถ้าหากไฟเลี้ยงมีค่าต่ำกว่า V_{BAT} ไอซี DS1307 จะเข้าสู่โหมดสำรองข้อมูล กระแสต่ำทันที จะไม่มีการส่งสัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา SQW/OUT แต่วงจรสร้างฐานเวลายังคงทำงานเพื่อให้ค่าของเวลาเดินไปอย่างไม่ผิดพลาด เมื่อมีไฟเลี้ยงปรากฏขึ้นอีกครั้ง DS1307 ก็จะสามารให้ค่าของเวลาเดินไปอย่างไม่ผิดพลาด เมื่อมีไฟเลี้ยงปรากฏขึ้นอีกครั้ง DS1307 ก็จะสามารให้ค่าของเวลาที่เป็นจริงแก่ผู้ใช้งานได้ต่อไป

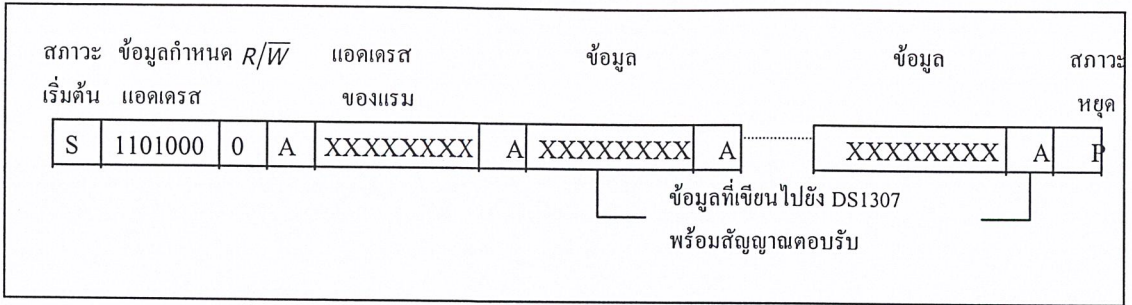
วงจรสื่อสารอนุกรมภายใน DS1307 ได้รับการกำหนดให้ทำงานตามรูปแบบของบัส I²C เป็นช่องทางสื่อสารระหว่าง DS1307 กับอุปกรณ์มาสเตอร์ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงหน่วยความจำที่ใช้เก็บค่าเวลาและหน่วยความจำใช้งานทั่วไปได้โดยการเขียนข้อมูลตามรูปแบบที่กำหนดในระบบบัส I²C

โหมดการทำงานของ DS1307

มีด้วยกัน 2 โหมดคือ โหมดเขียนข้อมูลและโหมดอ่านข้อมูล ในการใช้งาน DS1307 ตามปกติ จะใช้งานเฉพาะโหมดอ่านข้อมูลเท่านั้น เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับ DS1307 เพื่ออ่านข้อมูลของเวลาไปใช้งาน โหมดการเขียนข้อมูลจะถูกใช้งานก็ต่อเมื่อต้องการตั้งค่าเวลาใหม่และต้องการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำใช้งานทั่วไป อย่างไรก็ตามเมื่อเริ่มต้นติดต่อกับ DS1307 จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าสู่โหมดการเขียนข้อมูลก่อนเพื่อกำหนดแอดเดรสที่ต้องการอ่านข้อมูล จากนั้นจึงเปลี่ยนโหมดการทำงานมาเป็นโหมดการอ่านข้อมูล

โหมดการเขียนข้อมูล

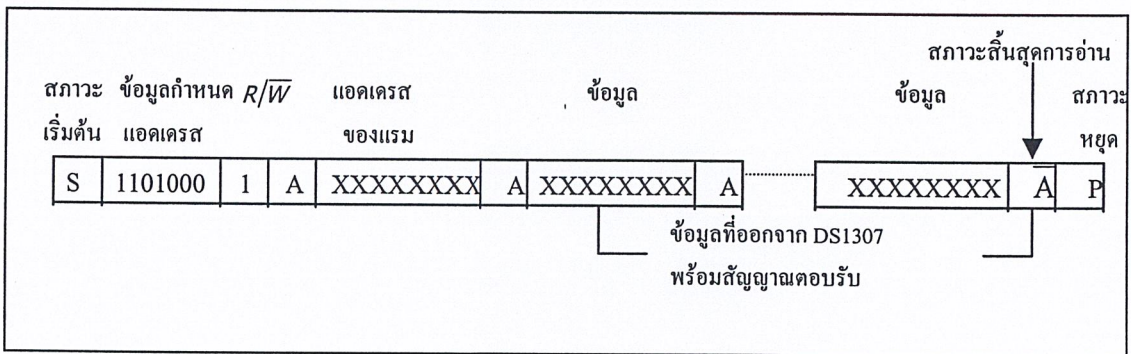
มีรูปแบบดังในรูปที่ 2.29 เริ่มต้นเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการกำหนดสถานะเริ่มต้น (START : S) จากนั้นส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรส 1101000 ตามด้วยข้อมูลเลือกการเขียน นั่นคือค่า 0 จากนั้นจะรอการตอบรับจาก DS1307 ขั้นตอนต่อมาคือ ส่งข้อมูลเพื่อเลือกแอดเดรสที่ต้องการเขียน จากนั้นรอการตอบรับจาก DS1307 เมื่อมีการตอบรับมาเรียบร้อย ก็เริ่มทยอยเขียนข้อมูลลงไปครั้งละแอดเดรส หลังจากเขียนข้อมูลในแต่ละแอดเดรส จะต้องหยุดรอการตอบรับจาก DS1307 ทุกครั้ง จึงจะสามารถเขียนข้อมูลต่อไปได้ เมื่อเขียนเรียบร้อยแล้วให้ส่งสถานะหยุด (STOP : P) เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเขียนข้อมูล



รูปที่ 2.30 รูปแบบของข้อมูลสำหรับติดต่อกับ DS1307 ในโหมดการเขียนข้อมูล

โหมดการอ่านข้อมูล

มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.31 เริ่มต้นการทำงานเหมือนกับโหมดการเขียนข้อมูล คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์กำหนดสถานะเริ่มต้นแล้วส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสตามด้วยข้อมูลเลือกการอ่าน ซึ่งเท่ากับ 1 จากนั้นรอการตอบรับจาก DS1307 เมื่อตอบรับเรียบร้อย DS1307 จะทยอยส่งข้อมูลออกมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คราวละ 1 แอดเดรสหรือ 1 ไบต์ โดยแอดเดรสที่เลือกอ่านข้อมูลจะต้องมีการกำหนดมาก่อนล่วงหน้าด้วยโหมดการเขียนข้อมูลวิธีการง่าย ๆ คือ เข้าสู่โหมดการเขียนข้อมูลก่อน เมื่อถึงจังหวะที่ต้องเขียนข้อมูล ให้ทำการสร้างสถานะเริ่มต้นและส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสใหม่อีกครั้ง ตามด้วยเลือกโหมดการอ่านข้อมูล ข้อมูลที่ออกมาจาก DS1307 ก็จะเป็นข้อมูลจากแอดเดรสที่กำหนดไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.31 รูปแบบของข้อมูลสำหรับติดต่อกับ DS1307 ในโหมดการอ่านข้อมูล

2.5 เทคนิคการมอดูเลชันพื้นฐาน

การมอดูเลชัน คือกระบวนการที่ทำให้พารามิเตอร์ของสัญญาณคลื่นพาห์ ตั้งแต่หนึ่งอย่างหรือมากกว่านั้นแปรตามลักษณะของข่าวสารที่เข้ามา คลื่นพาห์ที่เราใช้มักจะถูกอยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ซออยด์ (Sinusoidal) ที่มีพารามิเตอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ 3 ตัว คือ ขนาด (A) ความถี่เชิงมุม (ω) และเฟส (ϕ) โดยความสัมพันธ์ของทั้งสามตัวสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E(t) = A\sin(\omega t + \phi)$$

ถ้าเราเปลี่ยนแปลงขนาดของคลื่นพาห้ ตามลักษณะของข่าวสาร จะทำให้เกิดการมอดูเลชันที่เรียกว่า การมอดูเลตทางขนาด (Amplitude Modulation) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความถี่และเฟสของคลื่นพาห้ ตามลักษณะของสัญญาณข่าวสาร จะทำให้เกิดการมอดูเลชันทางความถี่ (Frequency Modulation) และการมอดูเลชันทางเฟส (Phase Modulation)

สามารถแบ่งการมอดูเลตออกเป็น 2 แบบใหญ่คือ การมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกและการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล

2.6 การมอดูเลตสัญญาณอนาล็อก (Analog modulation)

การมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. การมอดูเลตทางแอมพลิจูด (Amplitude Modulation ; AM)
2. การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation ; FM)
3. การมอดูเลตทางเฟส (Phase Modulation ; PM)

แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการมอดูเลตทางความถี่อย่างเดียว

2.6.1 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation ; FM)

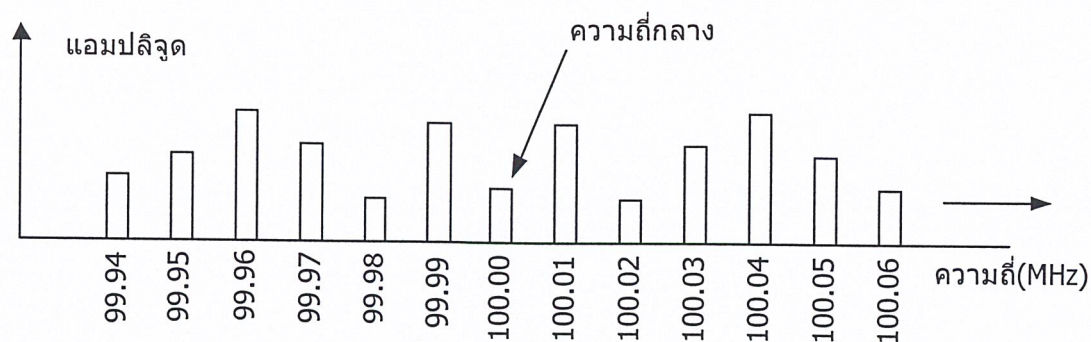
การมอดูเลตแบบนี้ขนาดของคลื่นพาห้จะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นพาห้จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามขนาดของสัญญาณเสียงที่นำมามอดูเลต ความถี่ของคลื่นพาห้ที่ยังไม่มีการมอดูเลต เรียกว่า ความถี่กลาง (Center Frequency)

เมื่อขนาดของความถี่เสียงเพิ่มขึ้นทางบวกก็จะทำให้คลื่นพาห้มีความถี่เพิ่มขึ้นและถ้าสัญญาณความถี่เสียงมีขนาดลดลงความถี่ของคลื่นพาห้ ก็จะลดลงจนกระทั่งขนาดของความถี่เสียงลดลงเป็นศูนย์ ความถี่ของคลื่นพาห้ก็จะเป็นความถี่กลาง

ในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณเสียงมีขนาดเป็นลบความถี่ของคลื่นพาห้ก็จะลดลงซึ่งความถี่ของคลื่นพาห้จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อขนาดของสัญญาณความถี่เสียงลดลงถึงจุดต่ำสุด ดังนั้นความถี่ของคลื่นพาห้จะเป็นความถี่กลางอีกครั้ง เมื่อสัญญาณความถี่เสียงผ่านครึ่งรอบลบไปถึงศูนย์

ดังนั้นจะเห็นแล้วว่า ความถี่ของคลื่นเอฟเอ็ม จะเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความถี่กลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณความถี่เสียง ความถี่ของคลื่นสัญญาณเอฟเอ็มที่แตกต่างจากความถี่กลางมากที่สุดเรียกว่า ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดของคลื่นพาห้ โดยจะประกอบด้วยความถี่เบี่ยงเบนไปจากความถี่กลางลงทางน้อยกว่า หรือเบี่ยงเบนไปในทางมากกว่า

ตัวอย่างเช่น คลื่นสัญญาณเสียงที่ต้องการความถี่ 10 kHz มอดูเลตกับคลื่นพาห้ที่มีความถี่ 100 MHz เมื่อมอดูเลตแล้วจะทำให้เกิดคลื่นสัญญาณ เอฟเอ็ม ที่มีความถี่ต่ำสุดเท่ากับ 99.99 MHz และความถี่สูงสุดเท่ากับ 100.01 MHz ดังนั้นความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดในกรณีนี้จะมีค่าเท่ากับ ± 10 kHz แสดงดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณเสียงความถี่ 10 kHz

กล่าวโดยสรุป สัญญาณ FM มีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- มีแอมพลิจูดคงที่ตลอด แต่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต
- อัตราการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณพาหะมีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต
- ช่วงความถี่เบี่ยงเบนหรือดีวีชันเป็นสัดส่วนกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต

2.6.2 ดัชนีการมอดูเลต

ในระบบ FM เรารู้ค่าเปอร์เซ็นต์การมอดูเลต โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งเรานิยมเรียกชื่อเสียใหม่ว่า ดัชนีการมอดูเลต ลองพิจารณาความหมายของดัชนีการมอดูเลตต่อไปนี้

$$m = \frac{f_d}{f_m}$$

เมื่อ f_d คือช่วงความถี่เบี่ยงเบน

f_m คือความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต

ค่าตัวเลขของดัชนีการมอดูเลตจะมีค่าสูง (แตกต่างจากเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนจะได้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1) ตัวอย่างเช่น ในระบบวิทยุกระจายเสียง FM เรากำหนดให้ความถี่เบี่ยงเบนของระบบสูงสุดไว้เท่ากับ 75 kHz มอดูเลตให้เกิดความถี่เบี่ยงเบนเต็มที่ ค่าดัชนีมอดูเลตจะเป็น

$$m = \frac{\text{kHz}}{\text{kHz}} =$$

สังเกตว่า ค่าดัชนีการมอดูเลตในระบบ FM ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณเสียงที่เข้ามามอดูเลต ในทางปฏิบัติเรานิยมวัดเป็นอัตราส่วนการเบี่ยงเบน (deviation ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่เบี่ยงเบน (ของระบบ) สูงสุด ($f_{d \max}$) ต่อความถี่สูงสุดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต ($f_{m \max}$) ในระบบกระจายเสียง FM ค่าอัตราเบี่ยงเบน (Δ) จะเท่ากับ

$$\Delta = \frac{f_{dm}}{f_{mm}}$$

$$= \frac{\text{kHz}}{\text{kHz}} =$$

ในระบบ FM เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลตสูงขึ้น การเบี่ยงเบนความถี่ของพาหะจะเบี่ยงได้มากขึ้น ในระบบวิทยุกระจายเสียง FM กำหนดให้ความถี่เบี่ยงเบนของระบบเดิมที่ไม่เกิน 75 kHz ถ้าเรามอดูเลตทำให้ความถี่ของพาหะเบี่ยงเบนไปเท่ากับ 75 kHz แสดงว่าเรามอดูเลต 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเราเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การมอดูเลต} = \frac{f_d}{f_{dm}}$$

ในที่นี้ f_d คือความถี่เบี่ยงเบน เนื่องจากสัญญาณที่เข้ามอดูเลต

f_{dmax} คือความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดของระบบ

2.6.3 ไซค์แบนด์ FM

จากการมอดูเลตแบบ FM ถ้าเรามอดูเลตด้วยสัญญาณไซน์ก็จะเกิดไซค์แบนด์จำนวนนับอนันต์ เนื่องจากการเบี่ยงเบนความถี่ของพาหะทำให้เกิดความถี่เพิ่มขึ้นอีกมากมาย ความจริงแล้วไซค์แบนด์ที่อยู่ห่างจากความถี่กลางมาก ๆ มักมีแอมพลิจูดเล็กมากจนไม่ต้องคำนึงถึง ในระบบ FM สัญญาณ FM จะรักษาแอมพลิจูดไว้คงที่เสมอ ซึ่งหมายความว่ากำลังของคลื่นพาหะย่อมกระจายไปอยู่ในไซค์แบนด์ ความสัมพันธ์ของพาหะกับไซค์แบนด์ในระบบ FM ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลตเนื่องจากดัชนีการมอดูเลตเป็นตัวกำหนดจำนวนของไซค์แบนด์ที่สำคัญและแอมพลิจูดของพาหะกับไซค์แบนด์ต่าง ๆ

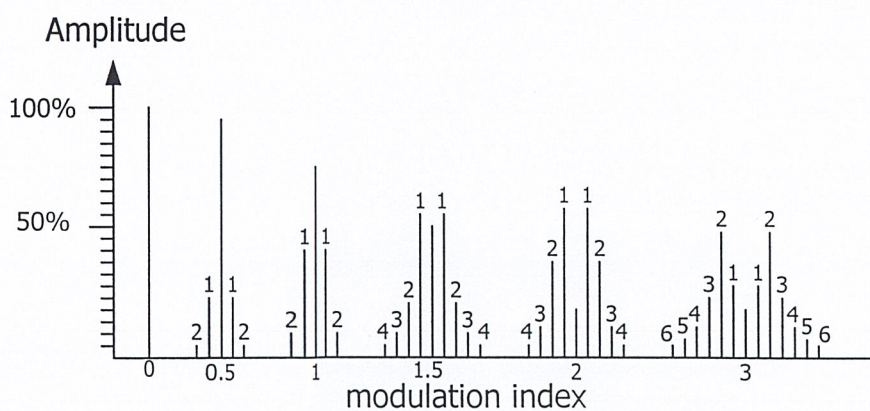
ในตารางที่ 2.5 แสดงตารางแอมพลิจูดของคลื่นพาหะกับไซค์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อดัชนีการมอดูเลตเป็นศูนย์จะมีแต่คลื่นพาหะอย่างเดียว (เท่ากับ 1 หน่วย) คลื่นไซค์แบนด์เป็นศูนย์เมื่อดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นจำนวนไซค์แบนด์จะเพิ่มขึ้น แอมพลิจูดของไซค์แบนด์ก็จะใหญ่ขึ้น แต่แอมพลิจูดของพาหะจะเป็นศูนย์ ตอนนี้กำลังของคลื่น FM จะไปอยู่ในไซค์แบนด์ทั้งสิ้น เมื่อดัชนีการมอดูเลตเพิ่มขึ้นอีก คลื่นพาหะก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีก (เป็นค่าลบแสดงว่าเฟสตรงกันข้ามกับตอนแรก เช่น เมื่อดัชนีการมอดูเลตเป็น 3.1 แอมพลิจูดของพาหะจะเท่ากับ -0.3 หน่วย) สังเกตว่าจุดที่คลื่นพาหะเป็นศูนย์นั้นมียุ่หลายจุด

จะตัดไซค์แบนด์ที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ของพาหะเดิม (ก่อนมอดูเลต) ออกไปโดยไม่คำนึงถึงเช่น เมื่อดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0.5 แอมพลิจูดของพาหะจะเท่ากับ 0.94 หน่วย ไซค์แบนด์คู่แรกมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.24 หน่วย ไซค์แบนด์คู่ที่สองถัดไปมีแอมพลิจูดเท่ากับ 0.03 หน่วย ไซค์แบนด์อื่นนอก

จากนี้มีแอมพลิจูดน้อยจนสามารถตัดทิ้งไปได้ เมื่อดัชนีการมอดูเลตสูงขึ้นการกระจายคลื่นไซด์แบนด์จะเป็นดังรูปที่ 2.33

ดัชนีการมอดูเลต	พาหะ	ไซด์แบนด์คู่ที่															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	1																
0.25	0.98	0.12															
0.5	0.94	0.24	0.03														
1	0.77	0.44	0.11	0.02													
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01												
2	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03												
2.5	-0.05	0.5	0.45	0.22	0.07	0.02											
3	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01										
4	-0.4	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02									
5	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02								
6	0.15	0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.03							
7	0.3	0	-0.3	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02						
8	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.1	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03					
9	-0.09	0.24	0.14	-0.18	-0.27	-0.26	0.2	0.33	0.3	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01			
10	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.31	0.29	0.2	0.12	0.06	0.03	0.01		
12	-0.05	-0.22	-0.08	0.2	0.18	-0.17	-0.24	-0.17	0.05	0.23	0.3	0.27	0.2	0.12	0.07	0.03	0.01
15	-0.01	0.21	0.04	0.19	-0.12	0.13	0.21	0.03	-0.17	-0.22	-0.09	0.1	0.24	0.28	0.25	0.18	0.12

ตารางที่ 2.5 การกระจายคลื่นพาหะและไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.33 รูปคลื่น FM ในเชิงความถี่ที่ค่าดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3

2.6.4 แบนด์วิดท์ของสัญญาณ FM

ในระบบ FM จำนวนไซด์แบนด์และแอมพลิจูดของไซด์แบนด์ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีการมอดูเลต โดยความถี่ของไซด์แบนด์มีค่าสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต กล่าวคือไซด์แบนด์คู่แรกมีความถี่เท่ากับ $f_c \pm f_m$ ไซด์แบนด์คู่ที่สองมีความถี่เท่ากับ $f_c \pm 2f_m, \dots$ ฯลฯ ฉะนั้นแบนด์วิดท์ของคลื่น FM ต้องครอบคลุมจำนวนไซด์แบนด์ที่สำคัญทุกตัว นั่นคือแบนด์วิดท์ขึ้นอยู่กับดัชนีการมอดูเลตและความถี่ของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต แต่ดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ f_d / f_m

ดังนั้นถ้าเราทราบความถี่เบี่ยงเบนและความถี่ของสัญญาณมอดูเลตเราก็สามารถคำนวณหาแบนด์วิดท์ได้ ตัวอย่างเช่นความถี่ของสัญญาณเสียงที่เข้ามามอดูเลตเท่ากับ 3 kHz ความถี่เบี่ยงเบนเท่ากับ 18 kHz เราคำนวณค่าดัชนีการมอดูเลตได้ดังนี้

$$m = \frac{f_d}{f_m} = \frac{\text{kHz}}{\text{kHz}} =$$

นำค่า $m = 6$ ไปหาไซด์แบนด์สำคัญที่พิจารณาได้จากตารางในรูปที่ 2.32 จะเห็นว่าเมื่อดัชนีการมอดูเลตเท่ากับ 6 จำนวนไซด์แบนด์จะมีอยู่ 9 คู่ เราจึงคำนวณหาแบนด์วิดท์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} BW &= f_m \times \text{จำนวนไซด์แบนด์} \times 2 \\ &= 3 \text{ kHz} \times 9 \times 2 \\ &= 54 \text{ kHz} \end{aligned}$$

ความจริงแล้วในทางปฏิบัตินิยมใช้สูตรคำนวณแบบประมาณจากค่า $f_{d \max}$ และ $f_{m \max}$ เลยไม่ต้องเสียเวลานับจำนวนไซด์แบนด์ ดังนี้

$$BW = 2(m + 1)f_{m \max}$$

หรือ $BW = 2(f_{d \max} + f_{m \max})$, เมื่อ $m = \frac{f_{d \max}}{f_{m \max}}$

จากตัวอย่างดังกล่าวเรากำหนดได้ว่า

$$\begin{aligned} BW &= 2 \times (6+1) \times 3 \\ &= 42 \text{ kHz} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} BW &= 2 \times (18+3) \\ &= 42 \text{ kHz} \end{aligned}$$

เสมือนกับว่าเราพิจารณาใช้จำนวนไซด์แบนด์เพียง 7 คู่ เมื่อเทียบกับการคำนวณในตอนต้น

2.6.5 การดีมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Demodulation)

การดีมอดูเลตสัญญาณหรือเรียกอีกอย่างว่า การดีเทคชัน (Detection) การแยกเอาสัญญาณเสียงหรือสัญญาณข้อมูลข่าวสารกลับคืนมาจากสัญญาณเอฟเอ็ม

ในการแยกสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณเอฟเอ็ม ขนาดของสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเปลี่ยนแปลงตามความเบี่ยงเบนของความถี่เอฟเอ็ม การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเสียงต่อความถี่ที่เบี่ยงเบนจะต้องถูกต้องตลอดเวลา ขณะที่สัญญาณเอฟเอ็มไม่มีการเบี่ยงเบนในทางที่สูงขึ้น ขนาดของสัญญาณเสียงจะเปลี่ยนเป็นบวกเพิ่มขึ้น จนกระทั่งสัญญาณเอฟเอ็มเบี่ยงเบนจนมีความถี่สูงสุด ขนาดของสัญญาณเสียงก็จะเป็นบวกสูงสุด ความถี่เบี่ยงเบนเริ่มลดลง ขนาดของสัญญาณเสียงก็จะลดลงจนกระทั่งเป็นความถี่กลาง สัญญาณเสียงก็จะเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณเอฟเอ็มเบี่ยงเบนทางด้านต่ำ สัญญาณเสียงก็จะเป็นลบมากที่สุด ขนาดของสัญญาณเสียงจะเป็นศูนย์อีกครั้งเมื่อความถี่เอฟเอ็มเป็นความถี่กลาง

ในการแยกสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณเอฟเอ็มมีความสำคัญอย่างมากในระบบดีมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม เพราะการแยกสัญญาณเสียงที่มีความถูกต้องเหมือนเดิมนั้น การทำงานจะต้องมีความถูกต้องและมีความไวในการเปลี่ยนความถี่เบี่ยงเบนให้เป็นสัญญาณเสียงได้ดี

2.7 การมอดูเลตสัญญาณดิจิทัล (Digital Modulation)

การมอดูเลตข้อมูลที่เป็นดิจิทัลจะมีหลักการพื้นฐานอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ

1. การมอดูเลตดิจิทัลทางขนาด (Amplitude Shift Keying ; ASK)
2. การมอดูเลตดิจิทัลทางเฟส (Phase Shift Keying ; PSK)
3. การมอดูเลตดิจิทัลทางความถี่ (Frequency Shift Keying ; FSK)

จากสมการทางคณิตศาสตร์ของคลื่นรูปไซน์ที่เราใช้เป็นพาหะ

$$E(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

คุณสมบัติประจำตัวของคลื่นรูปไซน์ที่สำคัญจะมีอยู่ 3 ประการ ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนแปลงหรือมอดูเลตได้ คือ แอมพลิจูด (A), ความถี่เชิงมุม (ω) และเฟส (ϕ)

สัญญาณดิจิทัลเบสแบนด์เป็นรูปสี่เหลี่ยมแสดงรหัสไบนารี “1” และ “0” ในการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลนี้ จากคุณสมบัติประจำตัวของคลื่นรูปไซน์ (คลื่นพาหะ) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้คือ แอมพลิจูด ความถี่เชิงมุมและเฟสจะเปลี่ยนไปตามสถานะ “1” และ “0” ของสัญญาณเบสแบนด์

2.7.1 การมอดูเลตดิจิทัลทางขนาด (Amplitude Shift Keying : ASK)

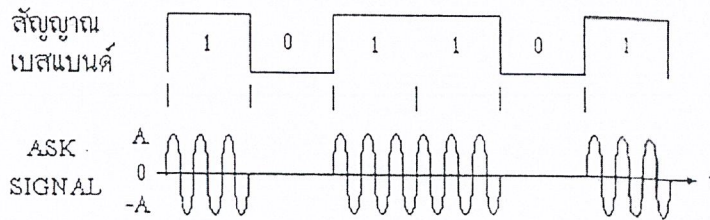
ในการมอดูเลตดิจิทัลทางขนาดบางครั้งเรียกว่า OOK (On – Off Keying) เพราะว่าคลื่นพาหะถูก อ่อนและออฟ ตามสัญญาณที่เป็น “1” และ “0” ถ้าคลื่นพาหะกำหนดโดยสมการที่ (1)

ดังนั้นสัญญาณ ASK จะกำหนดได้เป็น

$$E(t) = A\sin 2\pi f_1 t \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "1"}$$

$$= 0 \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "0"}$$

แสดงดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางขนาด

การมอดูเลตดิจิตอลทางขนาดจัดว่ามีประสิทธิภาพต่ำสุด และมีความผิดพลาดในการส่งข้อมูลสูง และใช้ในการสื่อสารที่ต้องการความเร็วของข้อมูลต่ำ (น้อยกว่า 100 บิต/วินาที)

2.7.2 การมอดูเลตดิจิตอลทางความถี่ (Frequency Shift Keying : FSK)

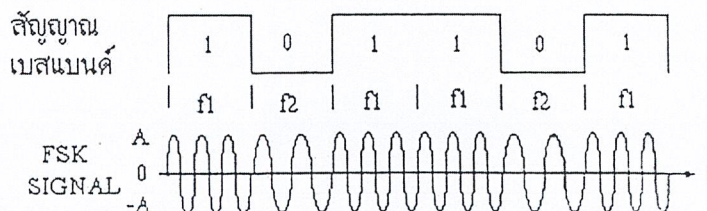
การมอดูเลตดิจิตอลทางความถี่เมื่อข้อมูลเป็นลอจิก "1" ก็จะได้สัญญาณอนาล็อกความถี่หนึ่งและเมื่อเป็นลอจิก "0" ก็จะได้สัญญาณอนาล็อกอีกความถี่หนึ่ง ถ้าสัญญาณพาหะเป็นดังสมการข้างต้น

ดังนั้นกรณีของการมอดูเลตแบบ FSK ความถี่ของคลื่นพาหะจะมี 2 ความถี่ เช่น ความถี่ f_1 สำหรับสัญญาณที่เป็นลอจิก "1" และความถี่ f_2 สำหรับสัญญาณที่เป็นลอจิก "0" ดังสมการข้างล่าง

$$E(t) = A\sin 2\pi f_1 t \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "1"}$$

$$E(t) = A\sin 2\pi f_2 t \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "0"}$$

แสดงดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางความถี่

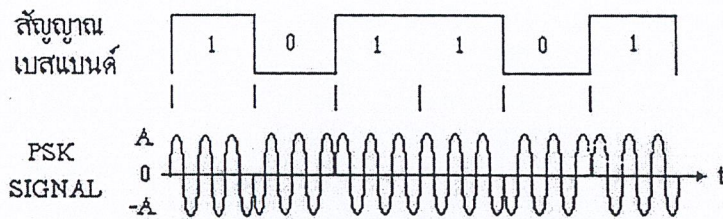
2.7.3 การมอดูเลตดิจิตอลทางเฟส (Phase Shift Keying ; PSK)

ลักษณะการมอดูเลตแบบเฟสชิฟคีย์อิง (Phase Shift Keying (PSK)) เป็นการมอดูเลตที่มีสัญญาณคลื่นพาห์ที่เอาท์พุทมีความถี่เดียว และมีขนาดแอมพลิจูดคงที่ แต่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสแทนข้อมูลที่เป็นดิจิตอล จำนวนของเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงไปนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของการมอดูเลต เช่นในระบบ PSK หรือ BPSK จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสไปมาอยู่ 2 เฟส คือ ข้อมูลบิต “0” สัญญาณคลื่นพาห์จะมีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศาและข้อมูลบิต “1” เฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือมีเฟสเป็น 0 องศา ถ้าสัญญาณพาหะเป็นคังสมการที่ (1) ดังนั้นสัญญาณ PSK จะกำหนดได้เป็น(กรณีที่ส่งครั้งละหนึ่งบิต)

$$E(t) = A\sin 2\pi f_c t \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "1"}$$

$$E(t) = A\sin(2\pi f_c t + \pi) \quad ; \text{เมื่อสถานะของบิตเป็น "0"}$$

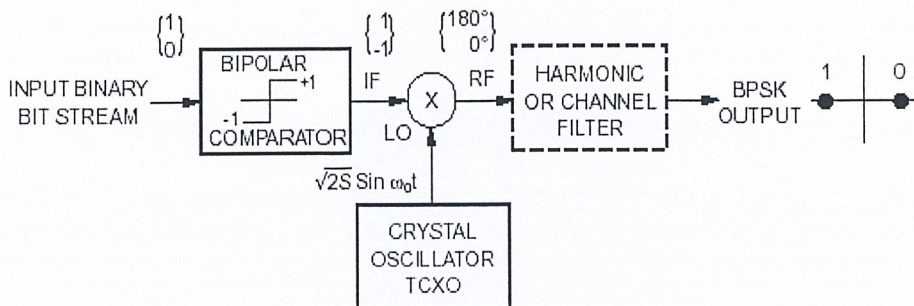
แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงรูปการมอดูเลตดิจิตอลทางเฟส

2.7.3.1 ภาคส่งสัญญาณ BPSK

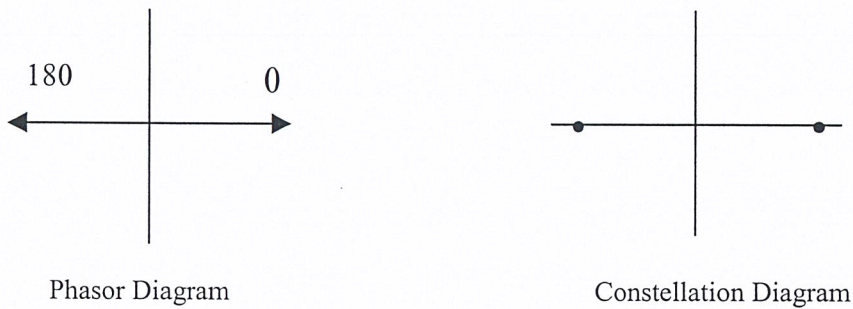
ลักษณะของบล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตโดยวิธีการแบบ BPSK แสดงดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 บล็อกไดอะแกรมของการมอดูเลตแบบ BPSK

จากรูปที่ 2.37 สัญญาณยูนิโพลาร์ (unipolar waveform) จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไบโพลาร์ (bipolar waveform) แล้วมอดูเลตกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ด้วยวงจรมอดูเลเตอร์สุดท้ายได้เป็นสัญญาณไปนาลีเฟสซิง

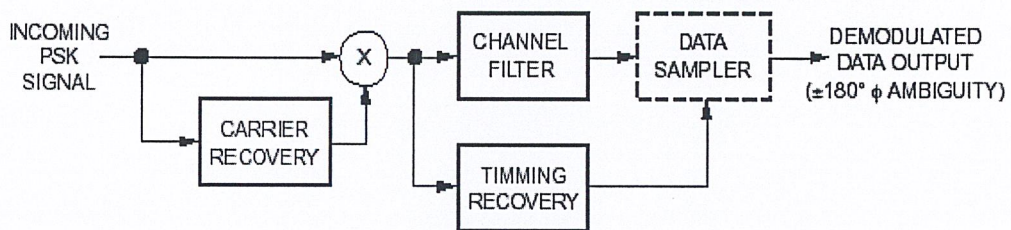
สถานะ Phase Diagram และ Constellation Diagram ของสัญญาณ BPSK แสดงดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 สถานะ Phase Diagram และ Constellation Diagram ของสัญญาณ BPSK

2.7.3.2 ภาครับสัญญาณ BPSK

ลักษณะของบล็อกไดอะแกรมของภาครับสัญญาณ BPSK จะแสดงดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ BPSK

2.7.3.3 ประสิทธิภาพของแถบความถี่ (Bandwidth Efficiency)

ประสิทธิภาพของแถบความถี่หรือความหนาแน่นของข้อมูล มักจะใช้ในการเปรียบเทียบการมอดูเลตแบบดิจิทัล เป็นอัตราส่วนของอัตราเร็วในการส่งกับแบนด์วิธต่ำสุด โดยจะทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ที่ 1 Hz ค่าที่ได้นี้จะแสดงจำนวนของข้อมูลบิตที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โดย

$$\begin{aligned}
 BW \text{ efficiency} &= \frac{\text{Transmission rate (bps)}}{\text{Minimum bandwidth (Hz)}} \\
 &= \frac{(\text{bits/Second})}{\text{hertz}} \\
 &= \frac{(\text{bits/Second})}{\text{cycle/Second}} \\
 &= \frac{\text{bits}}{\text{cycle}}
 \end{aligned}$$

การหาประสิทธิภาพของแถบความถี่สำหรับการมอดูเลตแบบ BPSK QPSK 8-PSK และ 16-QAM จากตารางเป็นการแสดงแถบความถี่ที่น้อยที่สุดที่ใช้ส่งสัญญาณที่มีอัตราการส่ง 10 Mbps โดยการมอดูเลตแบบต่าง ๆ

ชนิดแบบการส่งข้อมูล Modulate Scheme	แบนด์วิธต่ำสุดที่ใช้ (MHz)
BPSK	10
QPSK	5
8 - PSK	3.33
16 - QAM	2.5

ตารางที่ 2.6 แถบความถี่ที่น้อยที่สุดของรูปแบบการมอดูเลตต่างๆ

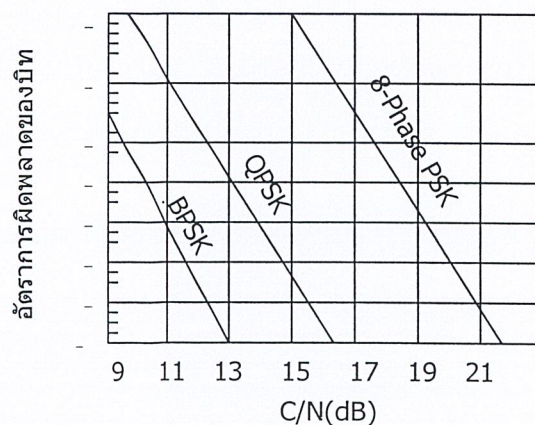
ดังนั้นถ้าที่การส่งข้อมูลที่ 10 Mbps จะเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพทางแถบความถี่ ในทฤษฎีของการมอดูเลตแบบ PSK แบบต่าง ๆ จะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \text{BPSK BW efficiency} &= \frac{\text{Mbps}}{\text{MHz}} = \frac{\text{bit}}{\text{cycle}} \\ \text{QPSK BW efficiency} &= \frac{\text{Mbps}}{\text{MHz}} = \frac{\text{bit}}{\text{cycle}} \\ \text{8-PSK BW efficiency} &= \frac{\text{Mbps}}{\text{MHz}} = \frac{\text{bit}}{\text{cycle}} \\ \text{16-QAM BW efficiency} &= \frac{\text{Mbps}}{\text{MHz}} = \frac{\text{bit}}{\text{cycle}} \end{aligned}$$

Modulation	Encoding	Bandwidth (Hz)	Baud	Bandwidth efficiency (bps/Hz)
FSK	Single bit	>Fb	Fb	<1
BPSK	Single bit	Fb	Fb	1
QPSK	Dibit	Fb/2	Fb/2	2
8PSK	Tribit	Fb/3	Fb/3	3
8QAM	Tribit	Fb/3	Fb/3	3
16PSK	Quadbit	Fb/4	Fb/4	4
16QAM	Quadbit	Fb/4	Fb/4	4

ตารางที่ 2.7 สรุปข้อแตกต่างของ FSK , PSK , QAM

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแถบความถี่ในการส่งข้อมูลที่ใช้ในการส่งสัญญาณลักษณะต่าง ๆ ในระบบ PSK ที่แตกต่างกันจะไม่เท่ากัน ในแบบ BPSK นั้นจะมีบิตเรท (bit rate=Fb) ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบ QPSK และแบบ M-ary PSK แต่แบบ BPSK นี้จะมีค่าผิดพลาดน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ทั้งหมด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 เปรียบเทียบอัตราการผลิตของบิตของ PSK แบบต่าง ๆ

2.8 วงจรกรองความถี่ (Filter)

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่ทำหน้าที่จัดการคัดเลือกความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ต้องการให้ผ่านไป ได้ ในขณะที่เดียวกันก็จะกำจัดหรือลดทอนความถี่อื่นที่นอกเหนือจากความถี่ที่ต้องการออก จะเรียกย่านความถี่ที่วงจรกรองยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (passband) และย่านความถี่ที่วงจรกรองจะกั้นไว้ไม่ให้ผ่านเรียกว่า ย่านความถี่หยุด (stopband)

วงจรกรองความถี่ที่ใช้งานโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter)

1. วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้ อุปกรณ์ที่ไม่ต้องการ ไฟเลี้ยงได้แก่ อุปกรณ์จำพวกตัวต้านทาน (Resistor ; R) ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor ; L) และตัวเก็บประจุ (Capacitor ; C) โดยอาศัยคุณสมบัติของอุปกรณ์ L และ C ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) เปลี่ยนแปลงตามความถี่ทำให้เกิดการกรองสัญญาณตามความถี่ วงจรกรองชนิดนี้นิยมใช้กันมากในการ กรองสัญญาณที่มีความถี่สูงถึงสูงมาก เช่น ในโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบพกพา (mobile phone) แต่วงจรกรองชนิด นี้ไม่สามารถใช้ในย่านความถี่ต่ำได้เนื่องจากจะต้องใช้ตัวต้านทานขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสีย (loss) มาก

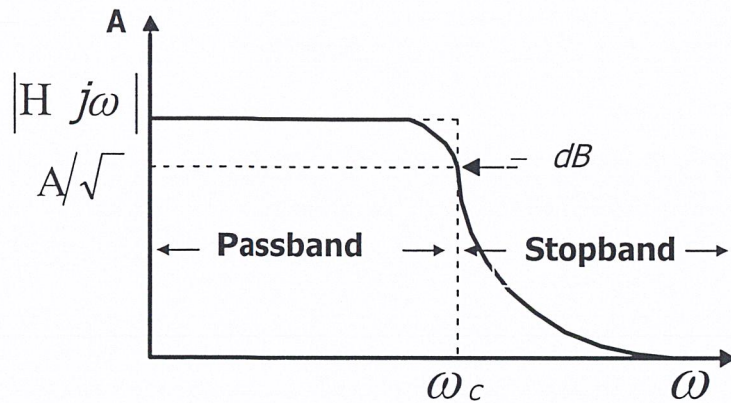
2. วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) เป็นวงจรกรองสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ใช้ อุปกรณ์ ประเภทแอคทีฟร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟที่นิยมใช้ใน ปัจจุบัน ได้แก่ วงจรกรอง active RC ประกอบไปด้วยออปแอมป์ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และวงจรกรองแบบ Gm-C ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทรานส์คอนดักเตอร์ (transconductor) และตัวเก็บประจุ วงจรกรองประเภท นี้นิยมใช้ในย่านความถี่ปานกลางไปจนถึงความถี่สูง

ในการจำแนกชนิดของวงจรกรองความถี่ตามลักษณะการทำงานนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter ; LPF)
2. วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Filter ; HPF)
3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass Filter ; BPF)
4. วงจรกรองกำจัดแถบความถี่ (Notch or Band – Reject Filter ; BRF)
5. วงจรกรองผ่านทุกแถบความถี่ (Allpass Filter)

2.8.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านได้โดยพยายามให้มีการลด ทอนเพียงเล็กน้อย แต่ในกรณีที่สัญญาณมีความถี่สูงกว่าความถี่คัทออฟ (Cut off-Frequency) จะเกิดการลด ทอนสูง ในทางอุดมคติวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถแยกความถี่สูงออกจากความถี่ต่ำได้อย่างเด็ดขาด แต่ ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ไม่ได้เนื่องจากมีค่าอินดักแตนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ที่มีผลทำให้เกิดมีริบเบิล (ripple) ติด ออกมา คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแสดงให้เห็นดังกราฟผลตอบสนองเชิงขนาดของ สัญญาณ

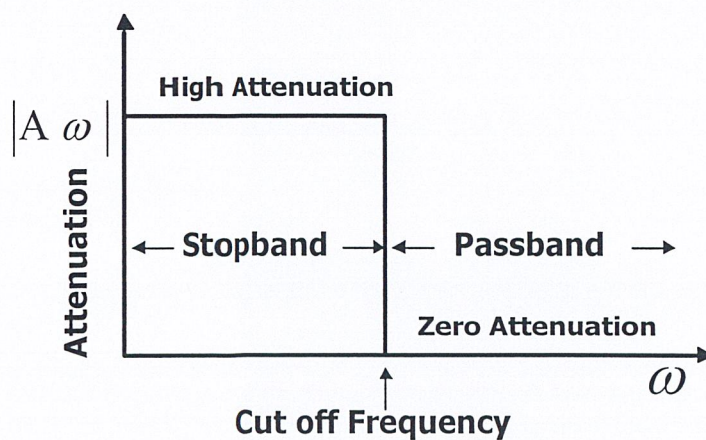


รูปที่ 2.41 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรรวมถี่ต่ำผ่าน

จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 2.41 นั้นเส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณ ในทางอุดมคติส่วนเส้นทึบที่เหนือคือผลตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในการใช้งานจริง ซึ่งสามารถแสดงคุณลักษณะเฉพาะได้ใกล้เคียงผลตอบสนองทางอุดมคติมากที่สุด ค่า ω_c (แปลงเป็น f_c ในหน่วย HZ ได้โดยใช้ $f_c = \omega_c / 2\pi$) เป็นความถี่คutoffกำหนดที่จุด $H(j\omega)$ มีค่า 0.707 เท่าของค่าแอมพลิจูดสูงสุดในที่นี้ แสดงด้วยค่า A ความถี่ในช่วงย่านที่สามารถผ่านได้อยู่ในช่วง ω มากกว่า 0 แต่น้อยกว่า ω_c และความถี่เกินจาก ω_c (ω มากกว่า ω_c) จะสามารถผ่านไปไม่ได้

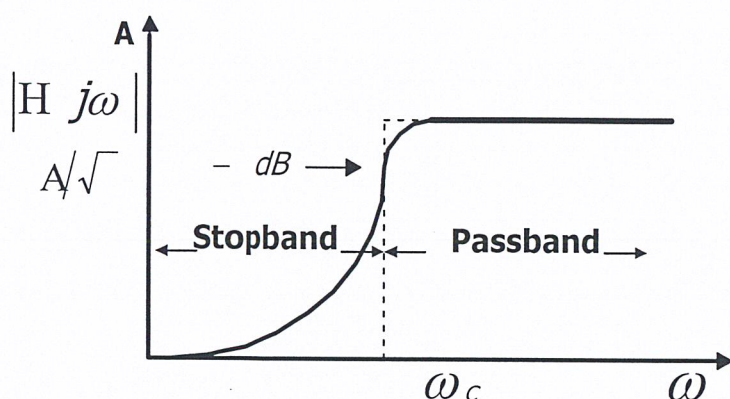
2.8.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงกว่าค่าความถี่ที่เลือกไว้ผ่านไป ได้ทั้งหมด ในขณะที่จะจำกัดหรือลดทอนความถี่ที่ต่ำกว่าค่าที่เลือกไว้ แต่ในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณต่ำกว่าความถี่คutoff จะเกิดการลดทอนสูง กล่าวได้ว่าเป็นลักษณะการทำงานที่ตรงกันข้ามกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ผลตอบสนองวงจรรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ

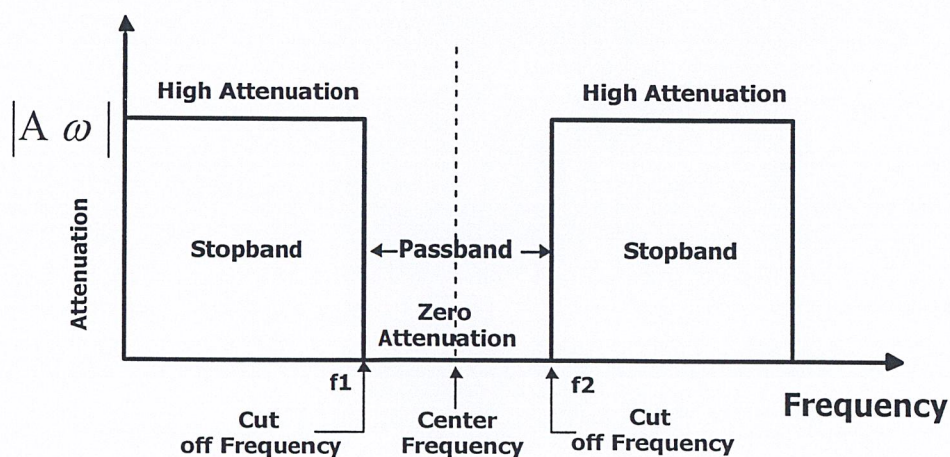
คุณสมบัติเช่นนี้ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.43 โดยเส้นประเป็นการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบนั้นแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดของสัญญาณในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.43 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

2.8.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านเป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ในช่วงหนึ่งที่ถูกเลือกไว้ผ่านวงจรชนิดนี้ไปได้เท่านั้นโดยสัญญาณที่ผ่านนั้นจะเกิดการลดทอนเพียงเล็กน้อย โดยจะลดทอนความถี่อื่นใดนอกเหนือจากช่วงกว้างของแถบความถี่ที่ได้เลือกไว้แล้วในที่นี้ตามรูปที่ 2.44 จะเห็นว่าค่าการลดทอนในย่านพาสแบนด์ (Passband) เป็นศูนย์ ในย่านสตอปแบนด์ (Stopband) ค่าการลดทอนจะมีค่าสูงมาก โดยที่ความถี่ f_1 และ f_2 เป็นความถี่คัทออฟ และในทางปฏิบัติความถี่ในย่านพาสแบนด์จะมีริบเบิลปะปนอยู่ด้วย

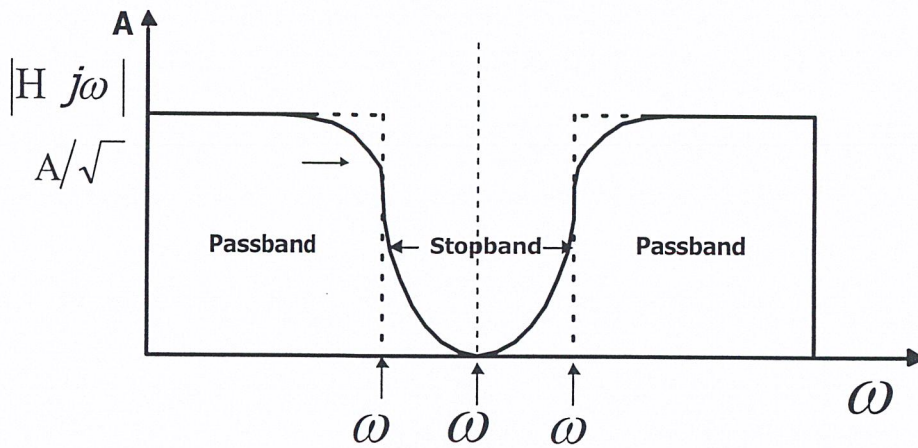


รูปที่ 2.44 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

2.8.4 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่

วงจรกรองกำจัดแถบความถี่เป็นวงจรกรองความถี่อีกแบบหนึ่ง ซึ่งยอมให้สัญญาณความถี่ตลอดย่านผ่านไปได้หมด ยกเว้นแถบความถี่ช่วงหนึ่งที่จะไม่ยอมให้สัญญาณผ่านไปได้ตามรูปกราฟการตอบสนองเชิงขนาดในรูปที่ 2.45 เส้นประแสดงถึงการตอบสนองเชิงขนาดในทางอุดมคติ ส่วนเส้นทึบแสดงถึงการตอบ

สนองเชิงขนาดในการใช้งานจริงแถบความถี่ซึ่งถูกลดทอนหรือกำจัดทิ้งนี้จุดกึ่งกลางอยู่ที่ (ω_0) โดยประมาณ ความกว้างของแถบความถี่เป็นแบนด์วิธ (BW) ซึ่งอยู่ในเทอมหน่วยของ HZ ความถี่กลาง (center) นี้มาจาก ($f_0 = \omega_0 / 2\pi$)



รูปที่ 2.45 ผลตอบสนองเชิงขนาดของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่

2.8.5 วงจรกรองผ่านทุกแถบความถี่

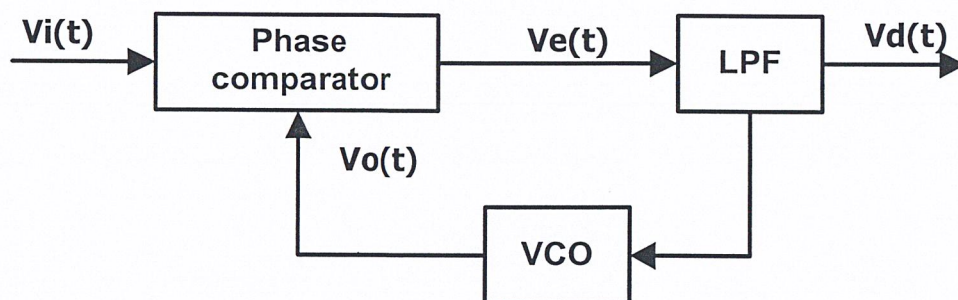
วงจรกรองผ่านทุกแถบความถี่เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีคุณสมบัติในการที่จะยอมให้สัญญาณทุกความถี่ผ่านไปได้อย่างเต็มที่ตลอดเวลา ในขณะที่เดียวกันจะทำการเปลี่ยนหรือเลื่อนเฟสของความถี่ไปด้วยค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง ถ้าค่าจำนวนที่กำหนดไว้เป็นค่าลดเสมือนกับการหน่วงสัญญาณความถี่ด้วยช่วงเวลาหนึ่งขณะที่สัญญาณเหล่านี้ผ่านวงจรกรองความถี่ชนิดนี้จะนั้นวงจรกรองผ่านทุกแถบความถี่นี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าวงจรไทม์ดีเลย์ หรือวงจรหน่วงเวลา เฟสที่เลื่อนไปหรือเวลาที่หน่วงออกไป การส่งผ่านความถี่หรือเวลาในสมการทรานเฟอร์ฟังก์ชัน นิยามด้วยค่า S ซึ่งเท่ากับ $(j\omega)$ จะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ในขณะที่แอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณยังคงมีค่าคงที่เท่าเทียมกันไปตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน

ข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบ แอคทีฟ ฟิลเตอร์ ที่มีเหนือกว่าวงจรกรองความถี่แบบ พาสซีฟ

1. การปรับอัตราขยายและปรับความถี่เป็นอิสระต่อกัน เราสามารถจัดค่าอัตราขยายของออปแอมป์ชดเชยกับอัตราลดทอนสัญญาณของวงจร RC หรือเพิ่มอัตราขยายของวงจรทั้งหมดด้วยการจัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ในส่วนของวงจรรขยายออปแอมป์ และการปรับเปลี่ยนความถี่ก็มีอยู่ที่ค่า RC เท่านั้น
2. ไม่มีปัญหาในเรื่อง Loading จากการที่ออปแอมป์ มีคุณสมบัติของ อินพุท อิมพีแดนซ์ (Input Impedance) สูงและ เอาท์พุท อิมพีแดนซ์ (Output Impedance) ต่ำวงจรกรองความถี่แบบ แอคทีฟฟิลเตอร์อาศัยออปแอมป์จึงไม่เกิดปัญหาการ Loading กับ เอาท์พุท และ อินพุท ของวงจร ณ จุดที่นำวงจรกรองความถี่ผ่านแบบแอคทีฟ ฟิลเตอร์เข้าไปต่อรวม
3. ราคาถูกกว่าเนื่องจากวงจรกรองความถี่ผ่านแบบแอคทีฟ ฟิลเตอร์ มีราคาถูกกว่า วงจรกรองความถี่ผ่านแบบพาสซีฟ ฟิลเตอร์ เพราะไม่ต้องอาศัยตัวเหนี่ยวนำที่มีราคาแพง

2.9 เฟสล็อกคูล (Phase Lock Loop : PLL)

คุณสมบัติของวงจรเฟสล็อกคูล คือ การทำให้ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ที่สามารถออสซิลเลตได้หลายๆ ความถี่ถูกล็อกไว้ ณ สถานะหนึ่งที่มีความถี่และมุมเฟสของสัญญาณตรงกับความถี่และมุมเฟสมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงซึ่งทำให้ออสซิลเลเตอร์มีความเที่ยงตรงเช่นเดียวกับสัญญาณมาตรฐานได้



รูปที่ 2.46 บล็อกไดอะแกรมวงจรเฟสล็อกคูล

วงจรเฟสล็อกคูลมีองค์ประกอบพื้นฐาน 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.41 คือ

1. เฟสดีเทกเตอร์ (Phase Detector)

เฟสดีเทกเตอร์ หรือเฟสคอมพาราเตอร์ (Phase Comparator) ประกอบด้วย 2 อินพุต ที่รับสัญญาณมาจาก VCO (Voltage Control Oscillator) ด้วยความถี่ของสัญญาณเท่ากับ f_o และมีความถี่ด้านอินพุต f_s เป็นตัวอ้างอิง เอาต์พุตเป็นตัวชี้ให้เห็นว่าสัญญาณ f_o มีเฟสเหมือนหรือแตกต่างจาก f_s

2. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter : LPF)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยความต้านทานและตัวเก็บประจุมีคุณสมบัติในการกำจัดสัญญาณไฟสลับของวงจรออสซิลเลเตอร์ของทั้ง 2 วงจรออกไปจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรเฟสดีเทกเตอร์ สัญญาณอินพุตที่เข้ามาที่วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีค่าผิดพลาด (error signal) พร้อมกับแรงดันไฟสลับกระแสเพื่่อม จะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟตรงที่กรองสัญญาณแล้วเพื่อป้อนต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณไฟตรงต่อไป

3. วงจรขยายสัญญาณไฟตรง (DC amplifier)

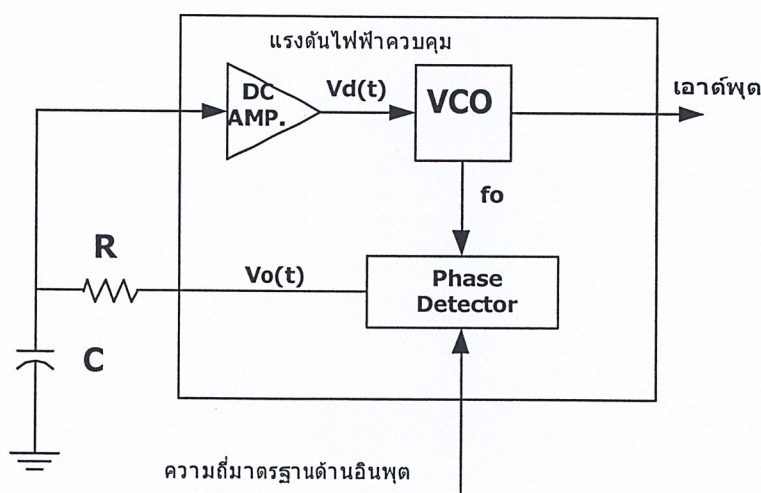
เป็นตัวเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อช่วยให้การควบคุมดีขึ้นเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณจะจ่ายแรงดันไฟตรงตามระดับที่ต้องการเพื่อป้อนให้แก่วงจร VCO

2.9.1 หลักการทำงานของวงจรเฟสล็อกคูล

เฟสล็อกคูลเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีหลักการทำให้ความถี่เอาต์พุตมีลักษณะเป็นไปตามความถี่ของสัญญาณอินพุต โดยเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณทั้งสอง ถ้าเฟสไม่ตรงกันจะไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นเพื่อแก้ไขความถี่ของออสซิลเลเตอร์ใหม่ให้เฟสต่างกันน้อยลงและจะเป็นอย่างนี้ตลอดไปจึงทำให้เฟสล็อกกันอยู่ได้

จากทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมและการป้อนกลับ วงจรเฟสดีเทคเตอร์หรือเฟสคอมพาราเตอร์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรขยายสัญญาณคลาดเคลื่อน (Error Amplifier) จะอยู่ในส่วนของฟอร์เวิร์ด (Forward Path) และ VCO อยู่ในส่วนป้อนกลับ (Feedback Path) จากรูปเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนในระบบ แรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ จะเป็นศูนย์ VCO จะทำงานตามความถี่ f_0 ที่ตั้งไว้เรียกว่าความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency) หรือความถี่ฟรีรันนิ่ง (Free running Frequency) ถ้ามีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับเฟสคอมพาราเตอร์จะทำการเปรียบเทียบเฟส และความถี่ของสัญญาณ VCO กับอินพุตแล้วสร้างแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน $V_o t$ ซึ่งสัมพันธ์กับความต่างเฟสและความถี่ของสัญญาณทั้งสอง

แรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านให้ความถี่ต่ำนั้นผ่านไปได้อีกจากนั้นจะขยายแล้วผ่านให้วงจร VCO ในลักษณะเช่นนี้ แรงดันไฟฟ้าควบคุม $V_d t$ จะกลับไปบังคับให้ความถี่ VCO แปรไปในทิศทางที่ลดความแตกต่างระหว่างความถี่ f_0 กับ f_s ลง จากนั้นด้วยความถี่เฟสล็อกคู่กับความถี่อินพุต f_s ใกล้เคียงกับ f_0 ก็จะทำให้ VCO ซิงโครไนซ์หรือล็อกกับสัญญาณอินพุตได้ และเมื่ออยู่ในสภาวะล็อกอย่างนี้ ความถี่ของ VCO จะเท่ากับความถี่อินพุตแต่เฟสแตกต่างกันเล็กน้อยการที่เฟสต่างกันจะทำให้ความถี่ฟรีรันนิ่งของ VCO เคลื่อนเข้าไปใกล้ไปหาความถี่สัญญาณอินพุต f_s เพื่อรักษาสภาพล็อกเอาไว้ให้ได้



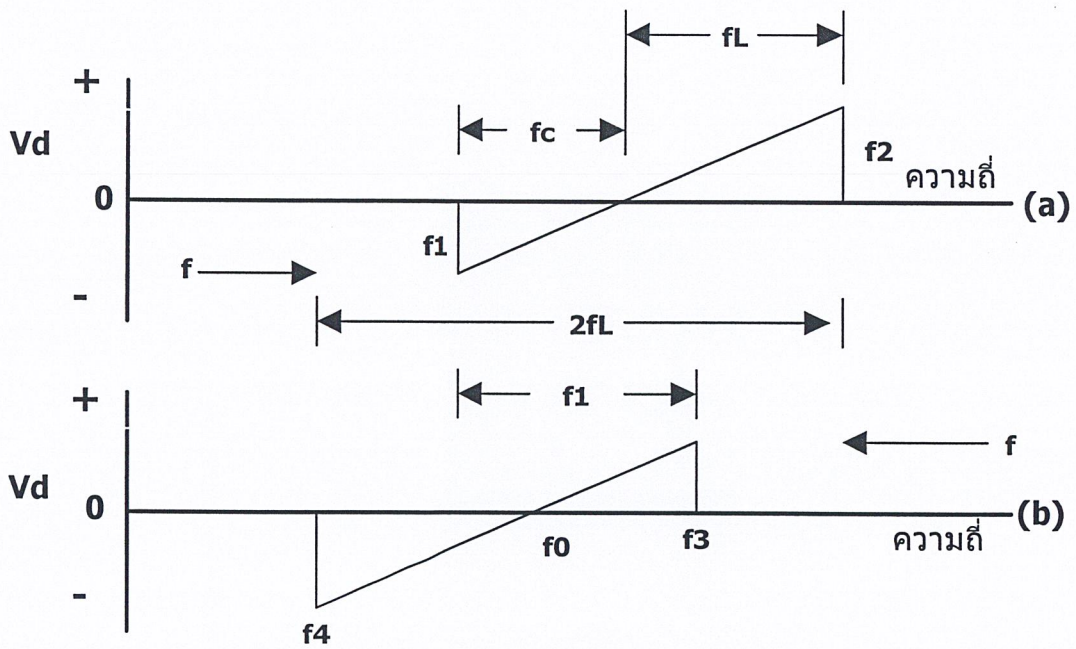
รูปที่ 2.47 องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรเฟสล็อก

ด้วยความสามารถในการปรับสภาพตัวเองให้ถูกต้องได้ของระบบ ขณะที่ลูปของวงจรรออยู่ในสภาวะล็อกจะทำให้ลูปสามารถตามรอยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ในช่วงความถี่โดยตลอดที่ลูปสามารถการล็อกไว้ได้เรียกว่า พิสัยในสภาวะล็อก (Locked Range) ของระบบ ส่วนช่วงความถี่โดยตลอดซึ่งลูปสามารถเข้ายึดการล็อกกับสัญญาณอินพุต(เริ่มล็อก)ได้ เรียกว่า พิสัยเข้าสู่สภาวะล็อก (Captured Range) ของระบบและพิสัยนี้จะไม่กว้างไปกว่าพิสัยในสภาวะล็อกอย่างแน่นอน

2.9.2 การเข้าสู่สภาวะล็อกและสภาวะขณะทีเฟสล็อก

จากรูปที่ 2.48 แสดงถึงทรานส์เฟอ์คาร์แรกเตอร์รีติคของเฟสล็อกระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในลูป ในตอนแรกจะพิจารณาถึงสภาวะล็อกก่อนโดยเฟสคอมพาราเตอร์ จะเป็นตัวผสมสัญญาณอินพุตเข้ากับสัญญาณ VCOทำให้เกิดผลบวก ($f_0 + f_s$) และผลต่าง ($f_0 - f_s$) ยังอยู่นอกขอบเขตที่วงจรรองความถี่ต่ำผ่านจะตอบสนองได้จึงถูกรองทิ้งไม่มีสัญญาณไหลภายในลูปดังนั้นในสภาวะนี้ VCO ยังคงทำงานความถี่เริ่มต้นเดิมคือความถี่ฟรีรันนิ่ง

ต่อมาเมื่อความถี่อินพุตเข้าใกล้ความถี่ของ VCO คือเท่ากับ $f(s)$ ดังรูปความถี่ผลต่าง ($f_s = f_0$) จะลดลงเข้าใกล้ขอบเขตความถี่ที่ LPF ไปได้ซึ่งจะไปขับ VCO ให้มีความถี่เข้าหาสัญญาณอินพุต f_s ในขณะนั้นความถี่ผลต่าง ($f_s = f_0$) จะลดลงเรื่อย ๆ (เนื่องจาก VCO ถูกขับให้มีความถี่เข้าใกล้ f_s มากขึ้น) ทำให้สัญญาณที่ส่งผ่าน LPF มีผลต่อ VCO มากขึ้นก็จะยิ่งเข้าใกล้ f_s จนในที่สุด ลูปก็จะเข้าสู่สภาวะเฟสล็อกได้เมื่อ ($f_s = f_0$)



รูปที่ 2.48 ทรานส์เฟอ์คาร์เตอร์รีติค ระหว่างความถี่กับระดับแรงดันไฟฟ้าเฟสล็อกลูป

(a)เมื่อเพิ่มความถี่สัญญาณอินพุต

(b)เมื่อลดความถี่สัญญาณอินพุต

ตอนที่ระดับแรงดันคลาดเคลื่อน : $V_e t$ เริ่มผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านได้แสดงว่าลูปตรวจจับได้ (สังเกตได้จาก VCO จะเริ่มเปลี่ยนความถี่ไปเพราะเฟ็งจะมีแรงดันไฟฟ้าผ่านมาจับเป็นครั้งแรก)

จากนั้นแรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ จะทำให้ความถี่ f_0 ของ VCO เปลี่ยนเข้าใกล้ f_s ยิ่งขึ้นและในที่สุดความถี่ทั้งสองก็เท่ากัน ($f_s = f_0$) ที่สภาวะนี้เรียกว่าลูปอยู่ในสภาวะล็อก (in lock)

ในขณะที่ลูปอยู่ในสภาวะล็อกแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน : $V_e t$ ซึ่งเกิดจากความต่างเฟสดังที่กล่าวมาแล้ว โดยเฉลี่ยจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน : $V_e t$ มีค่าแรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน : $V_e t$ มีค่าคงที่ไปด้วย เพื่อเป็นแรงดันไฟตรงขับให้ VCO มีความถี่ของสัญญาณอินพุตอยู่ตลอดเวลา

ตอนที่ลูปเริ่มล็อกกับสัญญาณอินพุตความถี่ของ VCO จะลดลงก่อน จากนั้นไปเมื่อเพิ่มความถี่ f_s ขึ้นการล็อกจะขึ้นอยู่กับความสามารถของ VCO ที่จะเปลี่ยนความถี่ไปโดยมีความลาดชัน (slope) ของการเปลี่ยนระหว่างความถี่กับแรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ เท่ากับ $1/ko$ (ko : Conversion Gain ของ VCO มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที/โวลต์) และเมื่อเพิ่มความถี่จนถึงความถี่ศูนย์กลาง $= f_0$ แรงดันไฟฟ้าควบคุม : $V_d t$ จะมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ลูปจะตามรอยสัญญาณอินพุตไปจนกระทั่งถึงความถี่ f_2 ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดของพิสัยในสภาวะล็อกไปแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน $V_e t$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์

หลังจากนั้นถ้าลดความถี่สัญญาณอินพุตลงมากก็จะเกิดวัฏจักรขึ้นอีกครั้งแสดงในรูปสัญญาณจะเริ่มกลับเข้าสู่การตรวจจับของลูปอีกที่ f_5 และลูปจะตามสัญญาณอินพุตได้แค่ถึง f_4 ช่วงความถี่จาก f_1 ถึง f_3 นี้เรียกว่าพิสัยการเข้าสู่สภาวะล็อก (Capture Range) และช่วงความถี่จาก f_2 กับ f_4 เรียกว่าพิสัยการล็อกหรือ locked range จากรูปคือ

$$f_3 - f_1 = 2f_c = \text{Capture Range}$$

$$f_2 - f_4 = 2f_L = \text{Locked Range}$$

จากทรานส์เฟอ์คาร์แรกเตอร์รีสติกสามารถกำหนดความถี่ศูนย์กลางในลูปได้โดยการตั้งความถี่ฟรีรันนิ่งที่ VCO และลูปจะตอบสนองเฉพาะความถี่สัญญาณที่อยู่ในช่วงจาก f_0 ถึง $f_0 \pm f_c$ หรือ $f_0 \pm f_L$ เท่านั้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ว่าลูปเริ่มต้นด้วยการล็อกหรือไม่ ในทางปฏิบัติการใช้งานของเฟสล็อกลูป โดยมากต้องการ VCO ที่มีคุณสมบัติในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้เป็นความถี่ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริงด้วยเพื่อประโยชน์ในการตามรอยสัญญาณอินพุต

2.9.3 พิสัยการเข้าสู่สภาวะล็อก (Capture Range)

นิยามได้ว่าเป็นพิสัยความถี่ที่มีศูนย์กลางอยู่ที่ความถี่เริ่มต้นของ VCO (คือความถี่ฟรีรันนิ่งที่ตั้งไว้) ตลอดพิสัยนี้ลูปสามารถดึงเข้าสู่การล็อกกับสัญญาณอินพุตได้ พิสัยการเข้าสู่สภาวะนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Lock-in range ก็ได้ซึ่งเป็นการวัดว่าสัญญาณอินพุตจะต้องมีความถี่ใกล้เคียงกับศูนย์กลางของ VCO :

f_0 มากน้อยเพียงใดลูบจึงเข้าสู่สภาวะล็อกได้ Lock-in range นี้จะเป็นครึ่งหนึ่งของ capture range (หรือเท่ากับ f_c)

Capture Range ถือว่าเป็นความถี่ใด ๆ ที่อยู่ภายใน Lock range และขึ้นอยู่กับขอบเขตของวงจรมอดูเลชันที่ต่ำผ่านกับอัตราขยายลูบปิด (Close-Loop gain) ของระบบ ซึ่งความสามารถของลูบในการเกาะจับกับสัญญาณอินพุตนี้จะเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงคุณสมบัติการเลือก (Selectivity) ความถี่ของลูบด้วย

2.9.4 พิสัยในสภาวะล็อก (Lock Range)

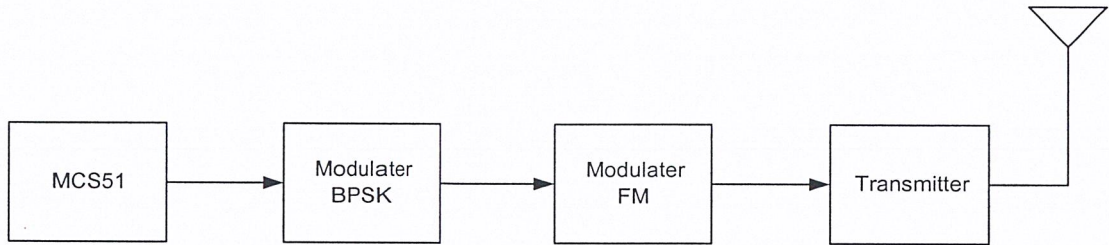
พิสัยในสภาวะล็อกคือพิสัยความถี่มีศูนย์กลางอยู่ที่ความถี่พรีรันนิ่งตลอดพิสัยนี้ลูบสามารถตามรอยสัญญาณอินพุตได้ในขณะที่ลูบอยู่ในสภาวะล็อก พิสัยในสภาวะล็อก Lock Range นี้อาจเรียกว่า tracking range หรือ holding range ก็ได้ ซึ่งมีความหมายว่าความถี่ของลูบสามารถจะไกลห่างออกไปจากความถี่ศูนย์กลางได้เท่าไร tracking range มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ Lock range หรือเท่ากับ f_L

บทที่ 3

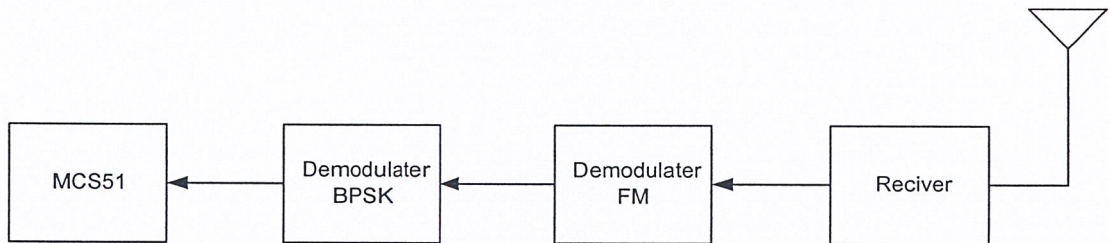
การคำนวณและการสร้าง

3.1 โครงสร้างของวงจร

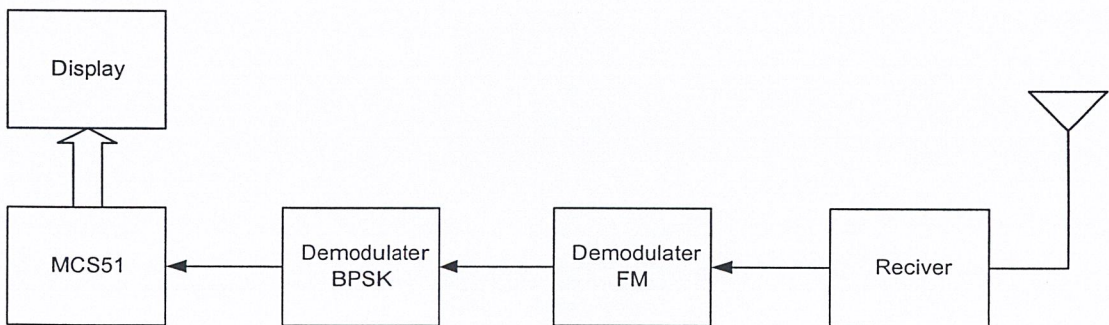
แสดงโดยใช้บล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1



(ก) ภาคลำส่งสัญญาณข้อมูลของรถเมล์และป้าย



(ข) ภาครับสัญญาณข้อมูลของรถเมล์



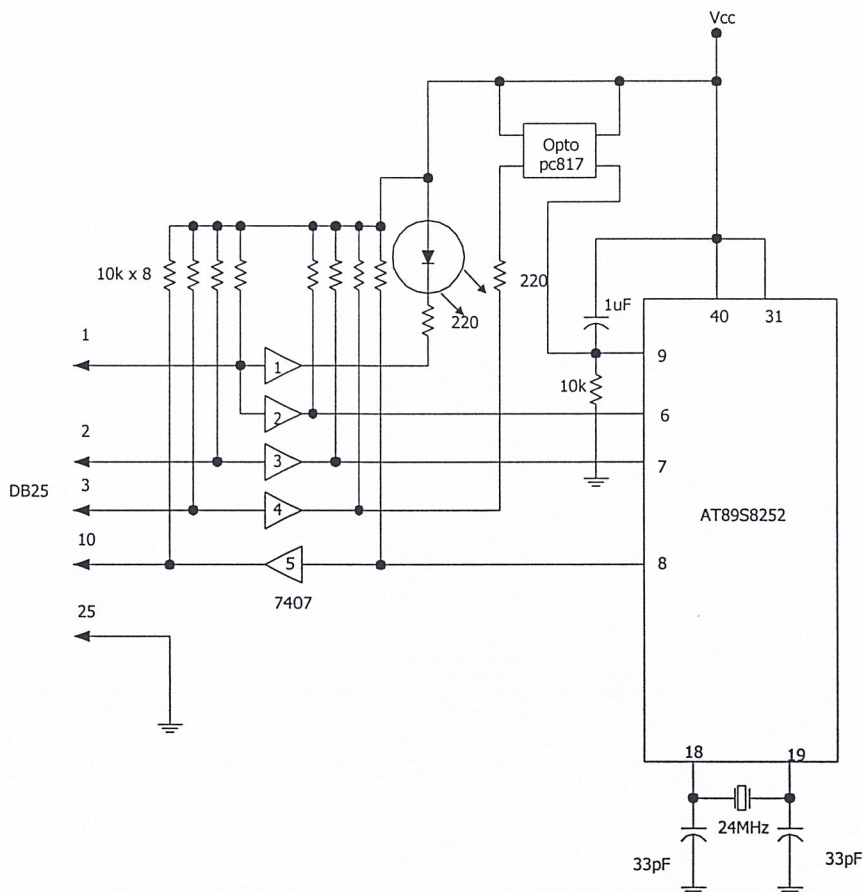
(ค) ภาครับสัญญาณข้อมูลของป้าย

รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของภาคลำส่งรับสัญญาณข้อมูล

3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ทางด้านป้ายรถประจำทาง

การรับและส่งข้อมูลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการทำงาน ในที่นี้ใช้เบอร์ AT89S8252 ซึ่งสามารถมีวงจรโปรแกรมในระบบได้ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานเป็นอย่างมาก อีกทั้งทางด้านป้ายยังมีวงจรทำงานร่วมตามบล็อกไดอะแกรมซึ่งมีการออกแบบวงจรต่างๆดังต่อไปนี้

3.2.1 วงจรโปรแกรมในระบบ (system burn)

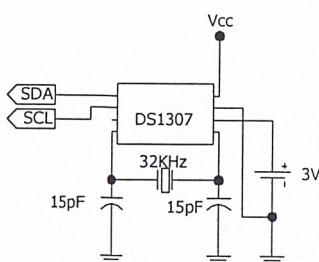


รูปที่ 3.2 แสดงวงจรโปรแกรมในระบบ

AT89S8252 มีคุณสมบัติในการติดต่อแบบ SPI (serial peripheral interface) ในวงจรนี้จะใช้เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ window98 ทำให้มีความสะดวกในการใช้มาก จากวงจรจะเห็นว่าจากคอมพิวเตอร์จะต้องมีบัฟเฟอร์ที่ใช้แปลงสัญญาณจาก TTL ไปเป็นแบบ CMOS เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบ CMOS แต่ทางด้านพอร์ตขนานเป็นแบบ TTL

และในขณะที่ทำการโปรแกรม LED ก็จะกระพริบตามจังหวะของข้อมูลด้วย Opto ที่ใช้ในวงจรจะใช้ในการรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ในขณะที่ลงโปรแกรม

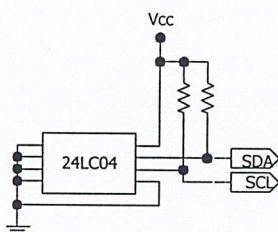
3.2.2 วงจรฐานเวลาจริง (real time clock)



รูปที่ 3.3 วงจรฐานข้อมูลเวลาจริง

วงจรถฐานข้อมูลเวลาจริงนี้ใช้ไอซีเบอร์ DS1307 ซึ่งเป็นไอซีที่ติดต่อผ่านทางโปรโตคอล I²C ซึ่งมีความเร็วในการติดต่อส่งผ่านข้อมูลสูงสุดที่ 400 kHz ซึ่งเป็นความเร็วที่ค่อนข้างสูง จากวงจรจะเห็นว่าจะต้องมีคริสตอล 32 kHz เพื่อใช้อ้างอิงในการฐานข้อมูลเวลา และที่สำคัญจะต้องมีแบตเตอรี่ขนาด 3V เพื่อใช้ในการรักษารฐานข้อมูลเวลาเอาไว้ไม่ให้ผิดพลาด

3.2.3 วงจรบันทึกข้อมูลของรถประจำทาง

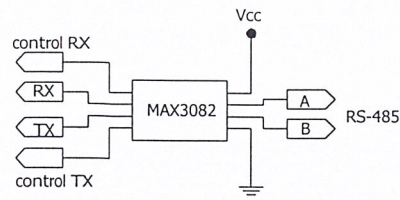


รูปที่ 3.4 วงจรบันทึกข้อมูล

ในโครงการนี้จะใช้หน่วยความจำแบบลบด้วยไฟฟ้าแบบข้อมูลไม่สูญหายแม้ไม่จ่ายไฟเลี้ยง (EEPROM) ใช้ในการบันทึกค่าเวลาที่รถประจำทางใช้ในการเดินทางระหว่างป้ายซึ่งจะใช้เป็นฐานข้อมูลเวลาในการนำมาคำนวณการคาดเดาเวลาของรถประจำทางที่ใช้เดินทางมาถึงป้ายในอนาคตในที่นี้ใช้ขนาดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 512 ไบต์ แต่สามารถเพิ่มได้ถึง 32 กิโลไบต์ในเบอร์ 24LC256 ซึ่งก็จะเก็บข้อมูลได้มากขึ้นกว่ามาก และยังสามารถต่อใช้งานได้มากถึง 8 ตัวทำให้ใช้เป็นฐานข้อมูลได้เป็นอย่างดี

3.2.4 วงจรแปลงสัญญาณจาก CMOS เป็น RS-485

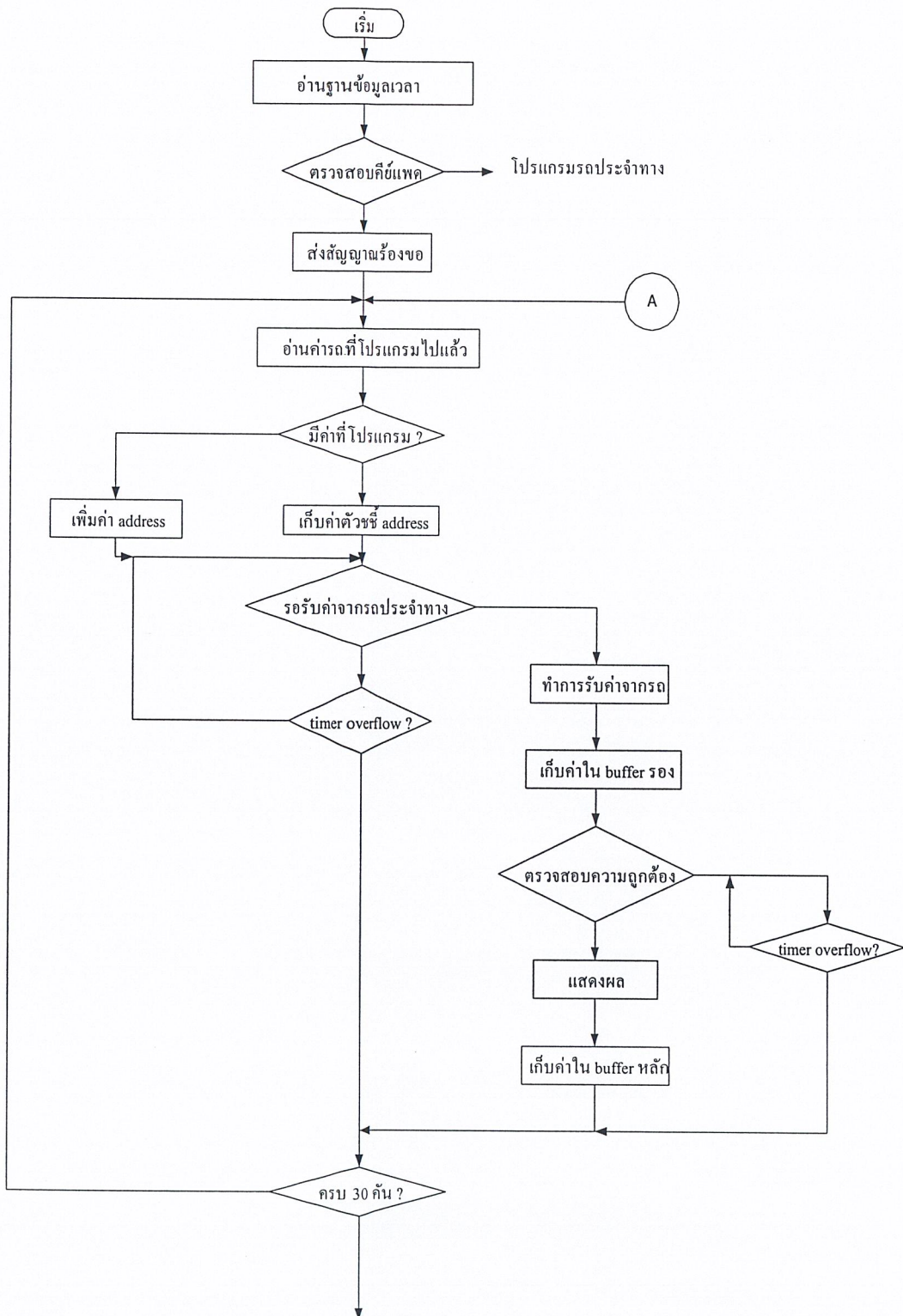
ในโครงการนี้จะใช้หน่วยความจำแบบลบด้วยไฟฟ้าแบบข้อมูลไม่สูญหายแม้ไม่จ่ายไฟเลี้ยง (EEPROM) ใช้ในการบันทึกค่าเวลาที่รถประจำทางใช้ในการเดินทางระหว่างป้ายซึ่งจะใช้เป็นฐานข้อมูลเวลาในการนำมาคำนวณการคาดเดาเวลาของรถประจำทางที่ใช้เดินทางมาถึงป้ายในอนาคตในที่นี้ใช้ขนาดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 512 ไบต์ แต่สามารถเพิ่มได้ถึง 32 กิโลไบต์ในเบอร์ 24LC256 ซึ่งก็จะเก็บข้อมูลได้มากขึ้นกว่ามาก และยังสามารถต่อใช้งานได้มากถึง 8 ตัวทำให้ใช้เป็นฐานข้อมูลได้เป็นอย่างดี

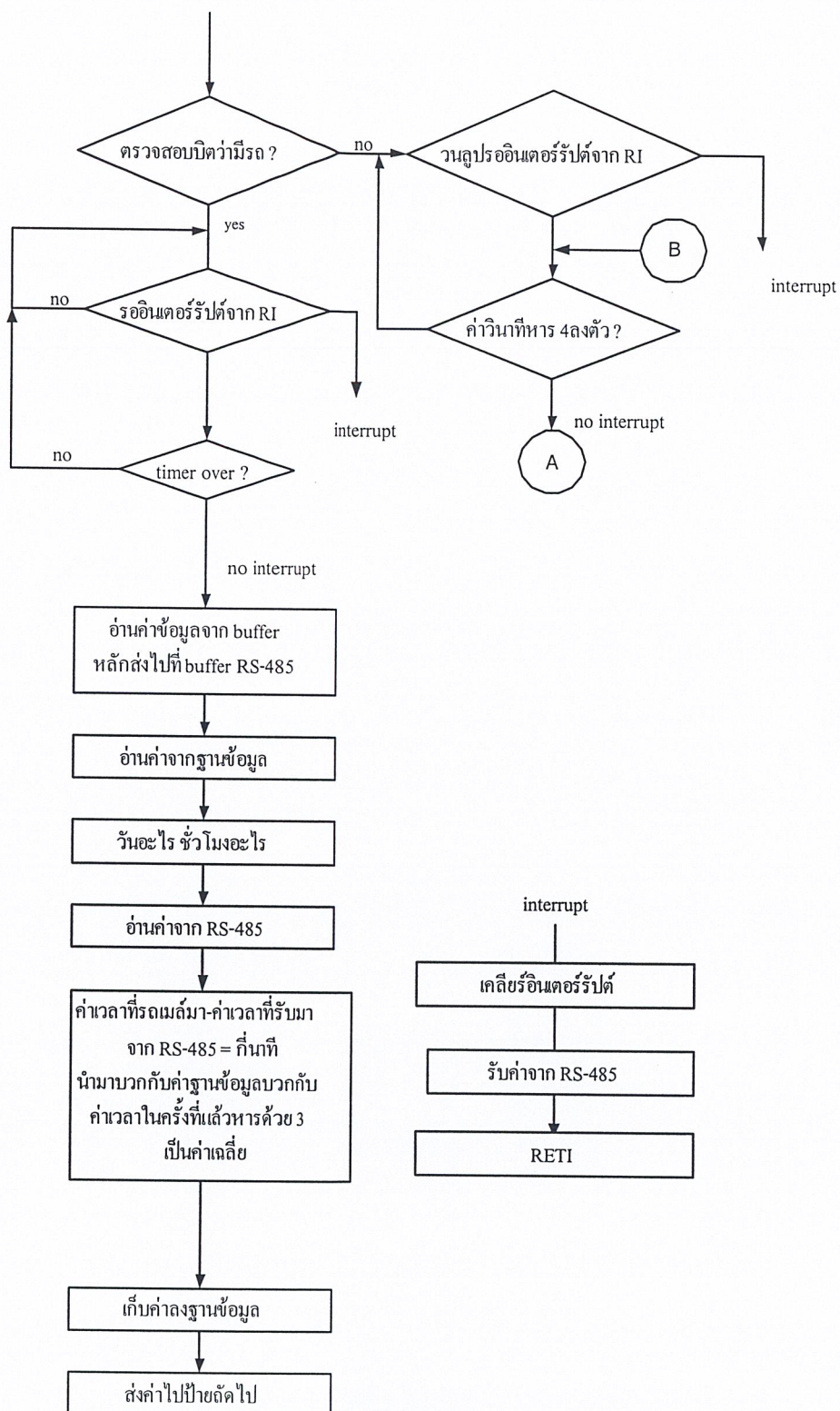


รูปที่ 3.5 วงจร RS-485

เป็นวงจรที่ใช้ติดต่อระหว่างป้ายกับป้ายโดยโปรโตคอล RS-485 ซึ่งสามารถสื่อสารกันในระยะทางสูงสุดที่ 1.2 กิโลเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่เพียงพอกับการใช้งานในที่นี้ ในวงจรจะเห็นว่าเป็นเบอร์ MAX3082 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณ RS-485 หรือจะใช้เบอร์ 75176 แทนก็ได้เช่นกัน

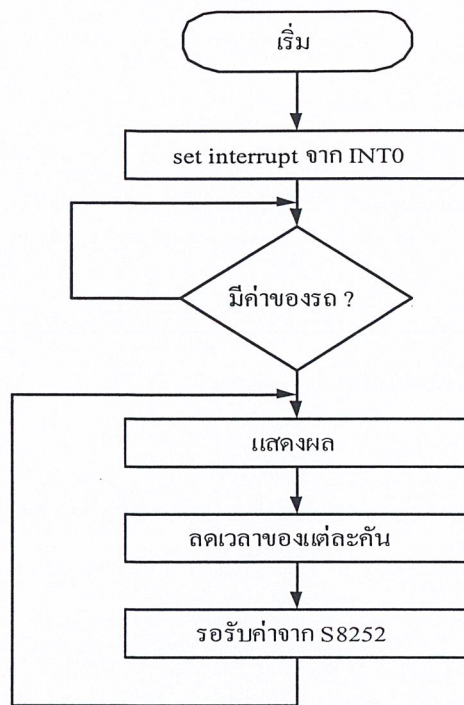
3.2.5 โฟลว์ชาร์ตของโปรแกรมทางด้านป้าย





รูปที่ 3.6 โพลัวร้ตบร้การอินเตอรืรับค้

3.2.6 โพล์วชาร์ตส่วนแสดงผล

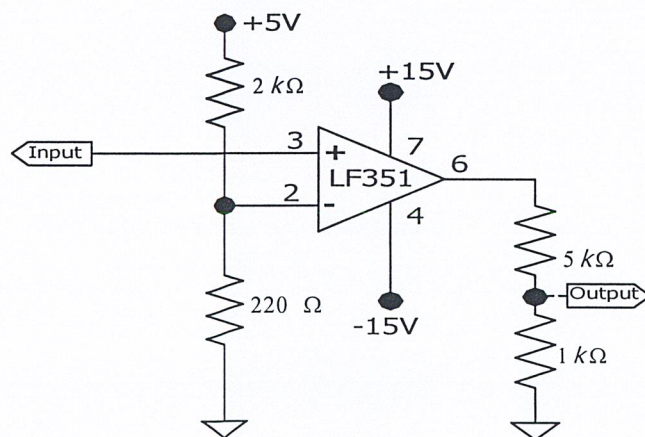


รูปที่ 3.7 โพล์วชาร์ตส่วนแสดงผล

3.3 การออกแบบบล็อกมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณ BPSK ประกอบด้วยวงจรต่าง ๆ ดังนี้

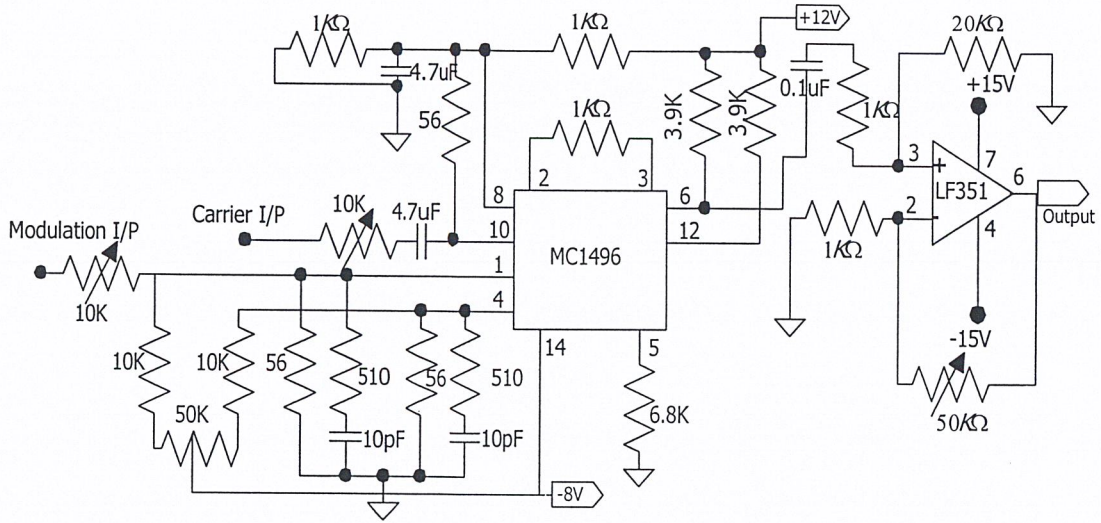
3.3.1 วงจรแปลงยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์

การออกแบบวงจรแปลงยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์ แรงดันที่ขา 2 จากการออกแบบจะมีค่าเท่ากับ 0.5 โวลต์ ใช้เพื่อเปรียบเทียบแรงดันอินพุตที่เข้ามาว่าจะได้แรงดันเข้าที่พุตเป็นบวกหรือลบ



รูปที่ 3.8 วงจรแปลงยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์

3.3.2 วงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์

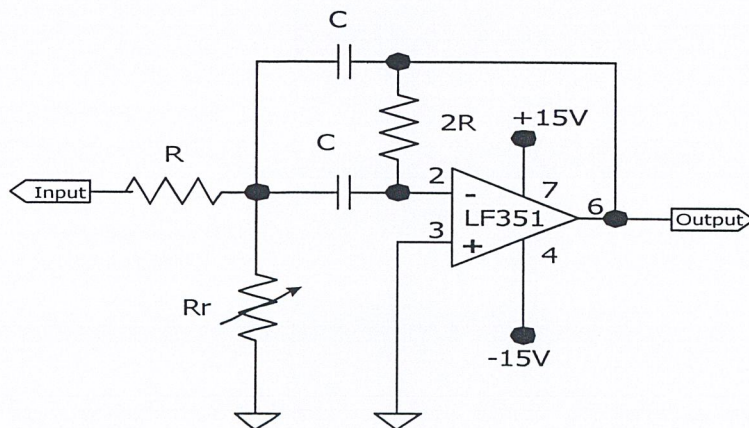


รูปที่ 3.9 วงจรมอดูเลต

ในการออกแบบวงจรมอดูเลตและวงจรมอดูเลตจะใช้วงจรเดียวกันและใช้ค่าต่าง ๆ ตามค่าตัวชี้

3.3.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

วงจรกรองแถบความถี่นี้ จะทำหน้าที่คัดเลือกสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการให้สามารถผ่านวงจรออกมาได้ โดยที่ไม่ถูกลดทอน วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน แบ่งเป็นสองแบบ คือ Narrow band filter และ Wide band filter ซึ่งวงจร Narrow band filter จะมีแบนด์วิธ มากกว่า 0.1 เท่าของความถี่รีโซแนนซ์ และวงจร Wide band filter จะมีแบนด์วิธน้อยกว่า 0.1 เท่าของความถี่รีโซแนนซ์ อัตราส่วนระหว่างความถี่รีโซแนนซ์กับแบนด์วิธเราเรียกว่า Quality : Q



รูปที่ 3.10 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

ในการออกแบบวงจรได้ออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบป้อนกลับแบบลบ(Negative Feedback Filter) ไว้สองวงจรคือ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz (แบนด์แคบ) และวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 8 kHz (แบนด์แคบและแบนด์กว้าง) แสดงขั้นตอนการออกแบบตามลำดับวงจรได้ดังนี้
ขั้นตอนในการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่าน 8 kHz (แบนด์แคบและแบนด์กว้าง)

1. วงจรกรองความถี่ผ่าน 8 kHz แบนด์วีธเท่ากับ 5 kHz

เลือก $C = 0.015 \mu\text{F}$; จากสูตร

$$BW = \frac{0.1591}{RC}$$

$$R = \frac{0.1591}{5000 \cdot 0.015 \cdot 10^{-6}}$$

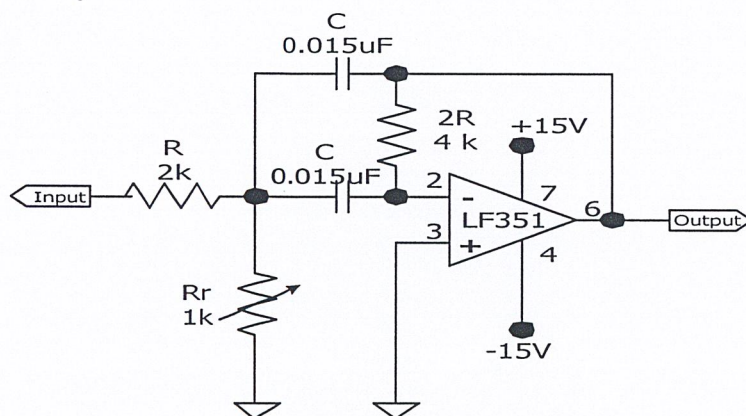
$$= 2\text{K}\Omega$$

$$Rr = \frac{R}{2Q^2 - 1} = 563.27\Omega$$

$$Rr = 1\text{k}\Omega$$

เลือกใช้

แสดงวงจรพร้อมค่าได้ดังรูปที่ 3.11

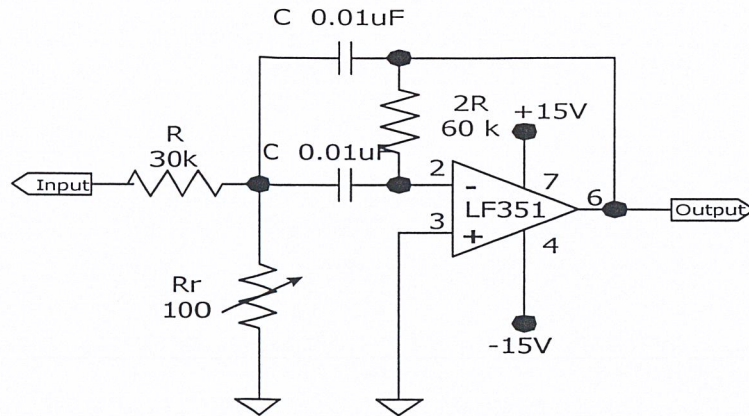


รูปที่ 3.11 วงจรกรองความถี่ผ่าน 8 kHz แบนด์กว้าง

2. วงจรกรองความถี่ผ่าน 8 kHz แบนด์วีธเท่ากับ 350 Hz

เลือก $C = 0.01 \mu\text{F}$ คำนวณจากสูตรจะได้ $R = 30 \text{ k}\Omega$, $2R = 60 \text{ k}\Omega$, $Rr = 100 \Omega$

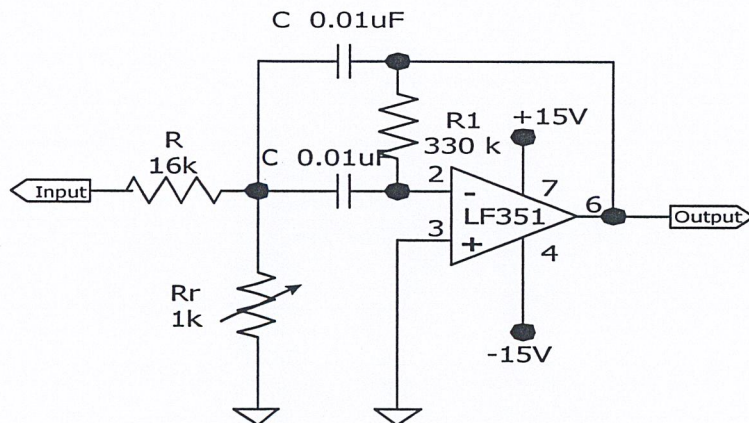
แสดงวงจรพร้อมค่าได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรกรองความถี่ผ่าน 8 kHz แบบดีแคบ

3. วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz แบบดีแคบ

เลือก $C = 0.01 \mu\text{F}$ คำนวณจากสูตรจะได้ $R = 16 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 330 \text{ k}\Omega$, $R_r = 1 \text{ k}\Omega$
แสดงวงจรพร้อมค่าได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz แบบดีแคบ

3.3.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ขั้นตอนการออกแบบ

1. เลือกความถี่คัตออฟ (f_c หรือ ω_c); $\omega_c = 2\pi f_c$, $f_c = 3 \text{ kHz}$
2. เลือก C3 (เพื่อความเหมาะสมปริมาณควรอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 μF)
3. หาค่า C1 และ C2 โดยเลือกค่า $C_3 = 0.01 \mu\text{F}$

$$C_1 = \frac{C_3}{2}; C_2 = 2C_3$$

$$C1 = 0.005 \text{ uF}$$

$$C2 = 0.002 \text{ uF}$$

4. หาค่า R จาก

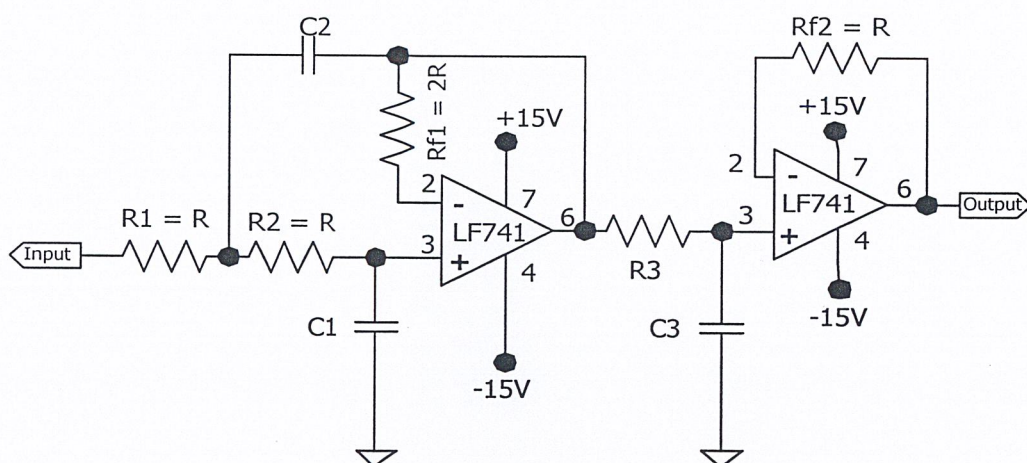
$$R = \frac{1}{\omega_c C3}$$

$$R = 5.3 \text{ k}\Omega$$

5. เลือกใช้ $R1 = R2 = R3 = R = 5.49 \text{ k}\Omega$

6. $Rf1 = 2R$, $Rf2 = R$ (เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม R และ 2R ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 $\text{k}\Omega$)

แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

3.3.5 วงจรเฟสล็อกคูลูป

ขั้นตอนการออกแบบ

1. กำหนดความถี่เอ๊าท์พุทที่ต้องการ ในโครงการนี้ต้องการ เอ๊าท์พุท 8 kHz

$$\text{เลือก } f_o = (7.5 - 8.5) \text{ kHz}$$

2. หาค่า $R1, R2$ โดยเลือก $C1 = 0.01 \text{ uF}$

จากสูตร

$$f_{\min} = \frac{1}{R2(C1 + 32 \text{ pF})}$$

$$R2 = 13.9 \text{ k}\Omega$$

เลือกใช้

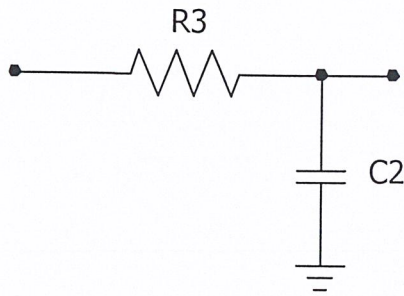
$$R2 = 16 \text{ k}\Omega$$

จากสูตร

$$f_{\max} = \frac{1}{R1(C1 + 32 \text{ pF})} + f_{\min}$$

$$R1 = 100 \text{ k}\Omega$$

3. หาค่าคutoffของวงจรกรองความถี่ต่ำตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

เลือกใช้ $\zeta = 0.7$ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่สุด และเลือกเฟสดีเทกเตอร์ตัวที่ 2

$$K\phi = VDD/4\pi \approx 0.4$$

$$K_{VCO} = 2\pi\Delta f / (VDD - 2)$$

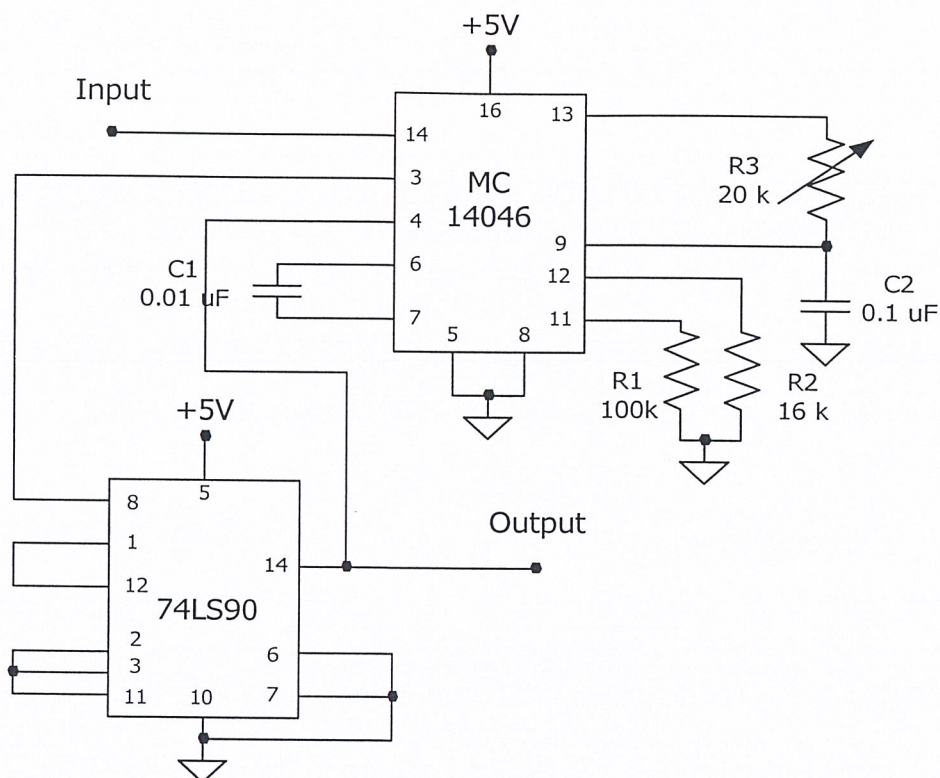
$$= 2094.39 \text{ r/s/v}$$

$$\zeta = \omega_n N / 2K\phi K_{VCO}$$

$$\omega_n = \sqrt{K\phi K_{VCO} / NR3C2}$$

$$N = 8; R3C2 = 0.0048721$$

เลือก $C2 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ ทำให้ได้ $R3 = 20 \text{ k}\Omega$ แสดงวงจรพร้อมค่าตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรเฟสล็อก

3.3.6 วงจรรวมสัญญาณ

ขั้นตอนการออกแบบ

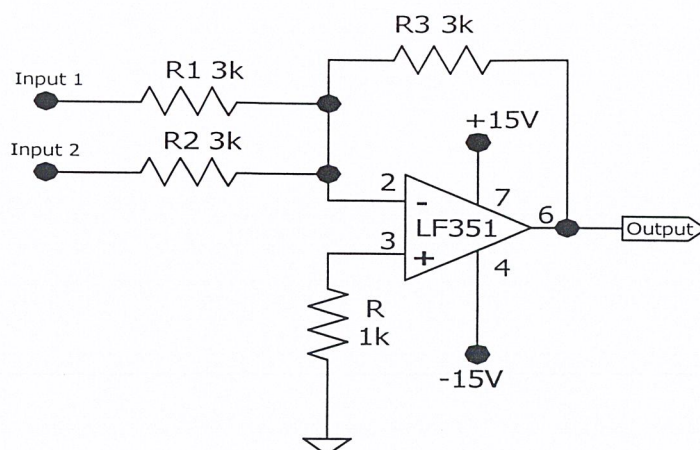
ในโครงการนี้ต้องการขยายเป็น 2 เท่าโดยมีสมการแรงดันเข้าที่พุดังนี้

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2\right)$$

$$R = R_1 // R_2 // R_3$$

เลือก $R_1 = R_2 = R_3 = 3k\Omega$ ทำให้ได้ $R = 1k\Omega$

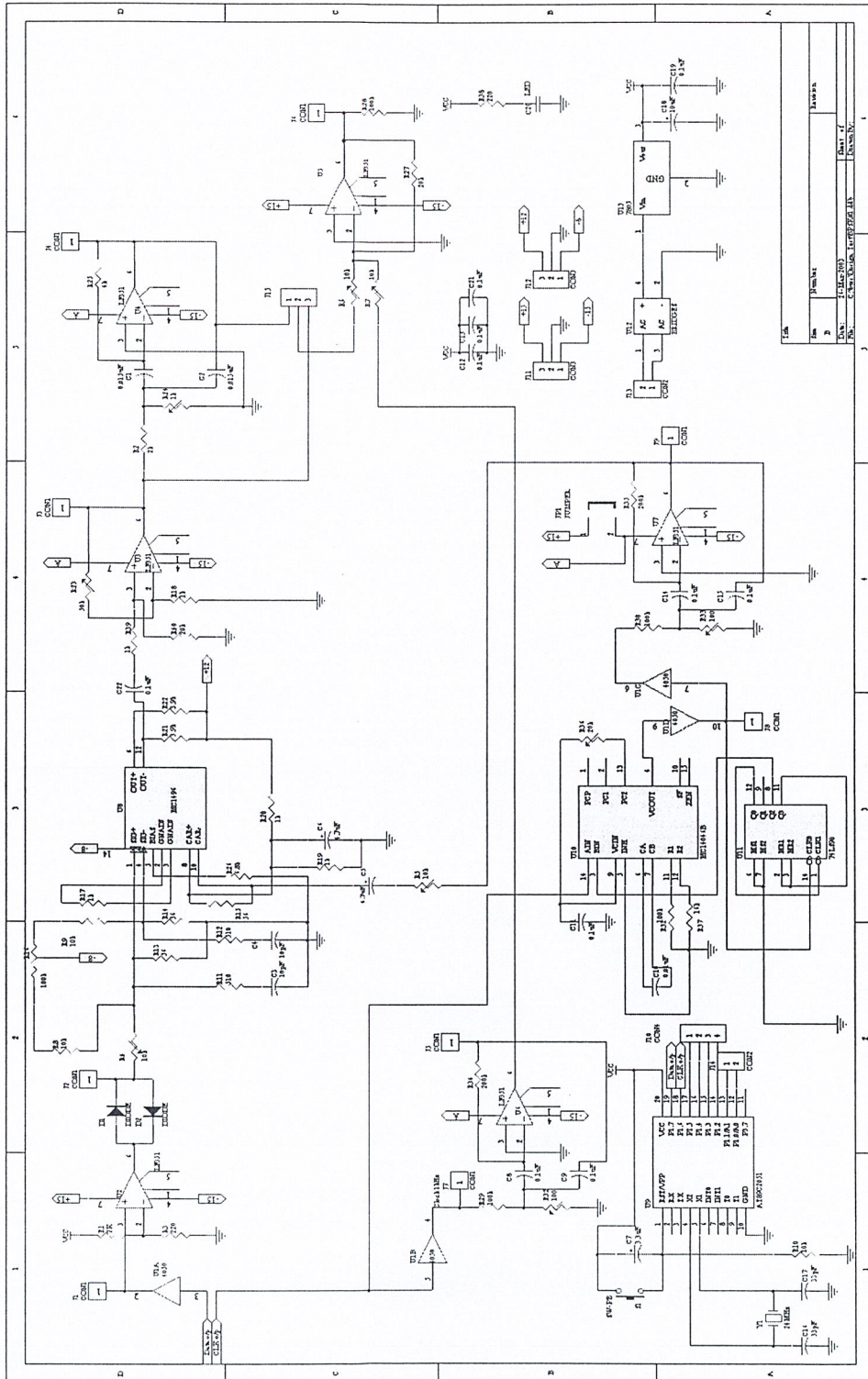
แสดงวงจรพร้อมค่าดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรรวมสัญญาณ

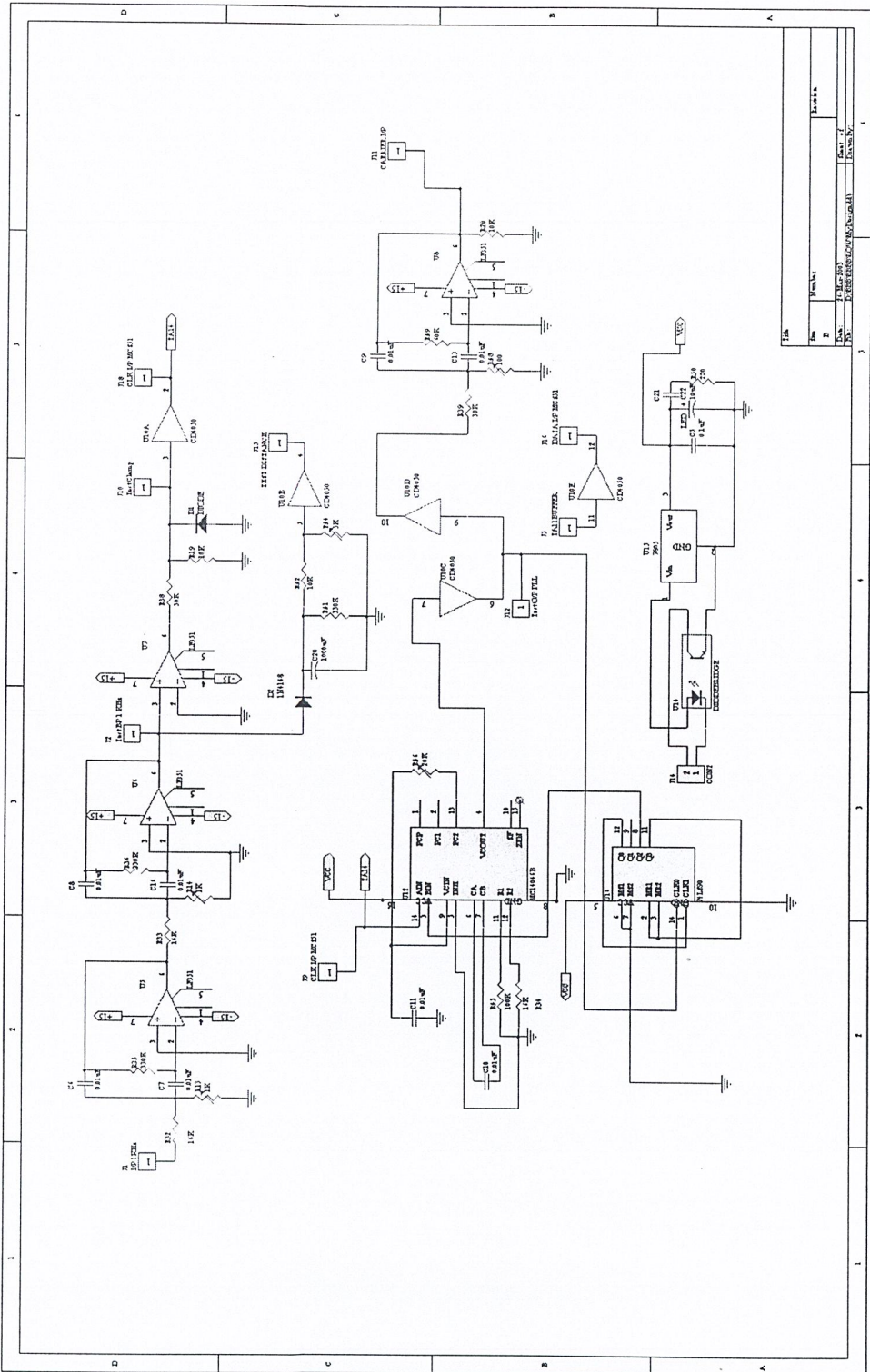
3.3.7 เครื่องส่งและเครื่องรับ FM ในโครงงานนี้ไม่ได้ทำการออกแบบวงจรแต่จะใช้เครื่องส่งและรับสำเร็จรูปมาใช้

3.3.8.3 วงจรส่วนเครื่องส่งทางด้ำนรอมเมต



รูปที่ 3.20 วงจรส่วนเครื่องส่งทางด้ำนรอมเมต

3.3.9.2 วงจรส่วนเครื่องรับแผ่นที่ 2



รูปที่ 3.23 วงจรส่วนเครื่องรับแผ่นที่ 2

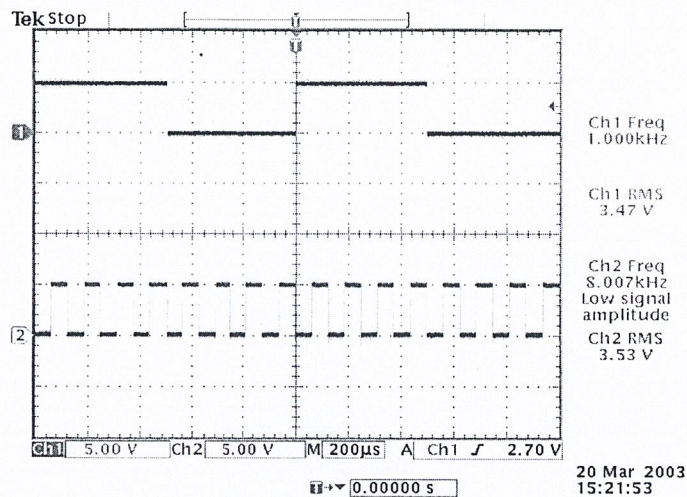
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 เครื่องส่ง

ในภาคเครื่องส่งก่อนส่งออกอากาศ จากเครื่องส่งสามารถวัดสัญญาณ โดยใช้ออสซิลโลสโคป วัดตามจุดต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 ภาควงจรกำเนิดสัญญาณอ้างอิงกับคลื่นพาห้วงจรภาคนี้จะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณคลื่นพาหะและกำเนิดสัญญาณนำร่อง

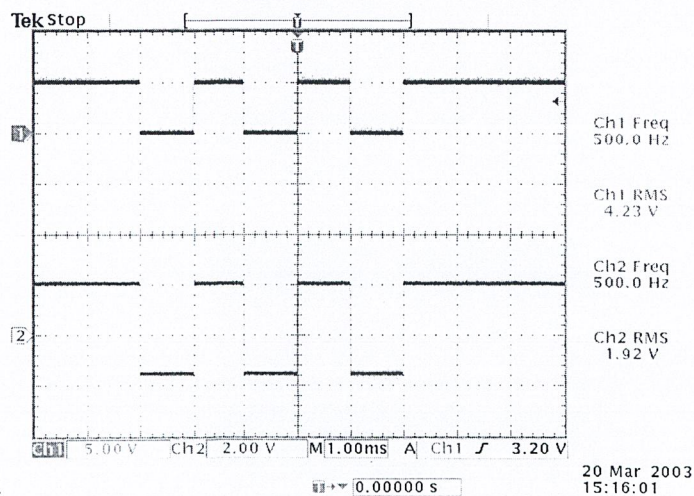


รูปที่ 4.1 สัญญาณนำร่องและสัญญาณคลื่นพาหะที่สร้างขึ้น

Channel 1 เป็นสัญญาณนำร่อง

Channel 2 เป็นสัญญาณคลื่นพาหะ

4.1.2 วงจรกำเนิดสัญญาณข้อมูลโพลาไร ความเร็วในการส่งข้อมูล 1 Kbit / sec แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณข้อมูลยูนิโพลาไรเทียบกับสัญญาณข้อมูลโพลาไร

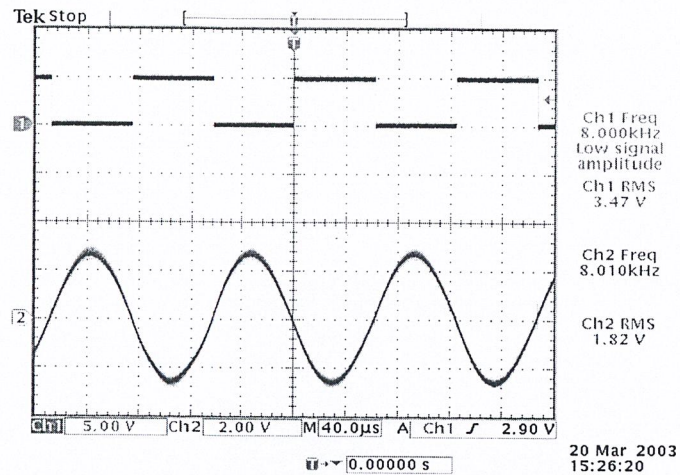
Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูลที่เกิดโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Channel 2 เป็นสัญญาณข้อมูลโพลาร์

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณข้อมูลนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89S8252 ซึ่งจะเขียนโปรแกรมทดลองแบบวนลูป

4.1.3 วงจรเฟสล็อกคูลูป

วงจรนี้จะทำหน้าที่ล็อกสัญญาณความถี่ 8 kHz เพื่อเป็นสัญญาณพาหะให้วงจรมอดูเลตต่อไป

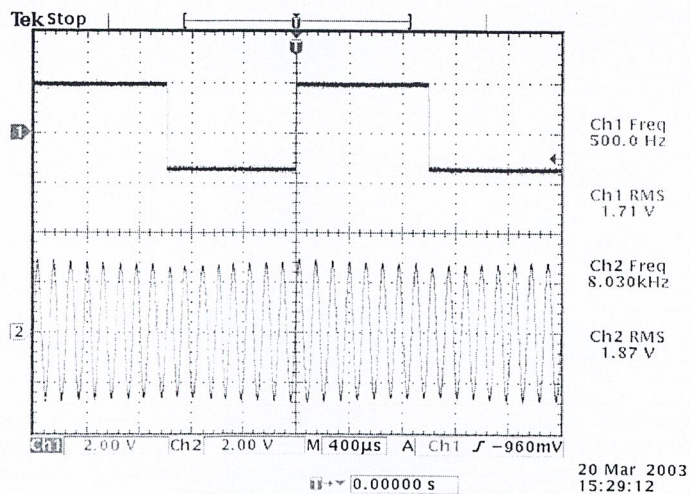


รูปที่ 4.3 สัญญาณคลื่นพาหะ

Channel 1 เป็นสัญญาณคลื่นพาหะที่เกิดโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Channel 2 เป็นสัญญาณคลื่นพาหะที่เอาท์พุทของวงจรเฟสล็อกคูลูป

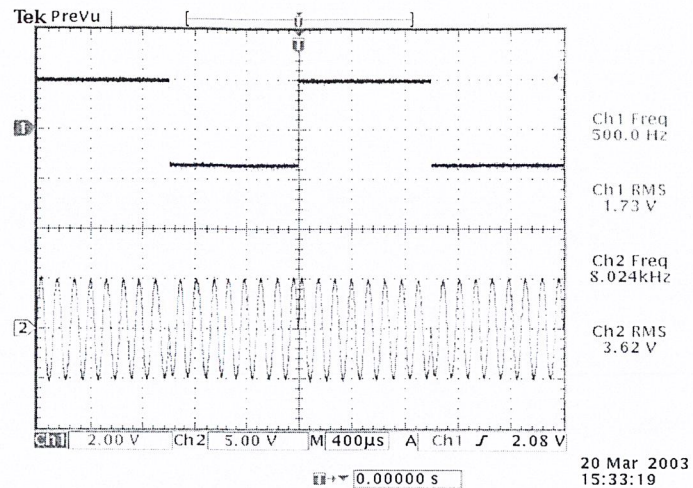
4.1.4 วงจรมอดูเลตแบบ BPSK



รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรมอดูเลต

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูล

Channel 2 เป็นสัญญาณคลื่นพาหะ



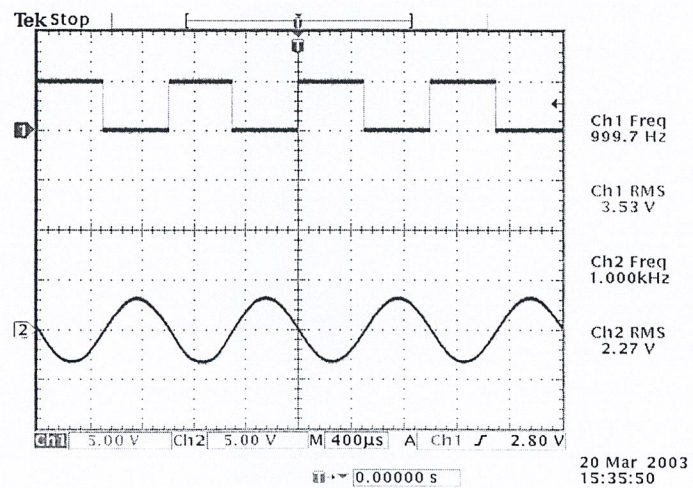
รูปที่ 4.5 สัญญาณข้อมูลเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรมอดูเลต

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูล

Channel 2 เป็นสัญญาณ BPSK

4.1.5 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านนี้จะทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่ 1 kHz เป็นสัญญาณนำร่องเพื่อไปรวมกับสัญญาณ BPSK ต่อไป



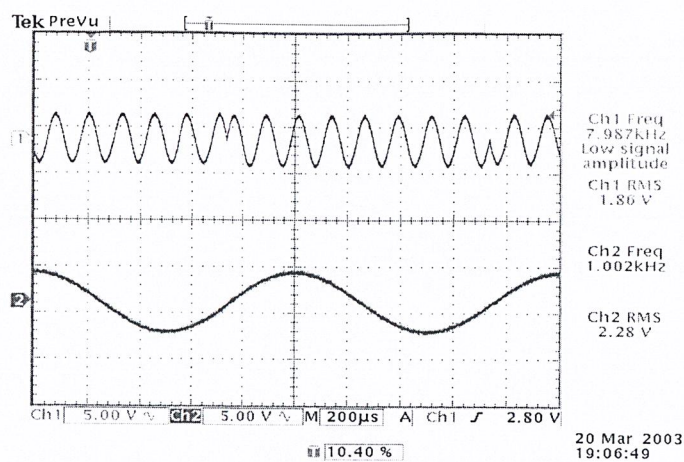
รูปที่ 4.6 สัญญาณนำร่อง 1 kHz

Channel 1 เป็นสัญญาณนำร่องที่กำเนิดโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

Channel 2 เป็นสัญญาณนำร่องที่เอาต์พุตของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

4.1.6 วงจรรวมสัญญาณ

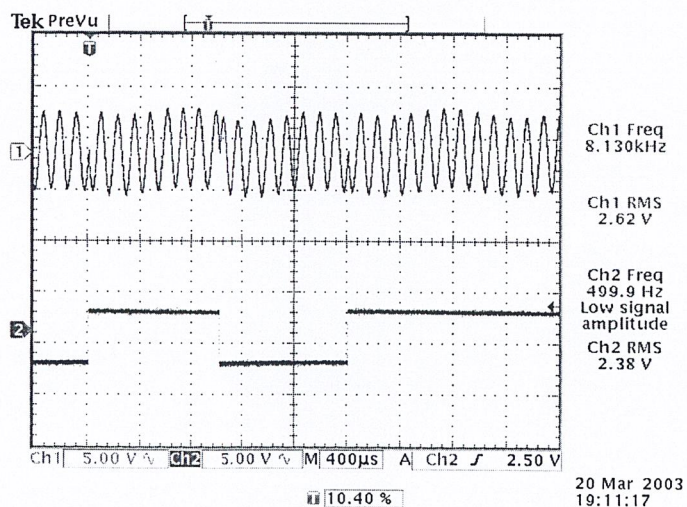
ในการส่งสัญญาณ BPSK จะทำการรวมสัญญาณ BPSK กับสัญญาณนำร่อง 1 kHz



รูปที่ 4.7 สัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรรวมสัญญาณ

Channel 1 เป็นสัญญาณ BPSK

Channel 2 เป็นสัญญาณนำร่อง 1 kHz



รูปที่ 4.8 สัญญาณ BPSK รวมกับสัญญาณนำร่องเทียบกับสัญญาณข้อมูล

Channel 1 เป็นสัญญาณ BPSK รวมกับสัญญาณนำร่อง

Channel 2 เป็นสัญญาณข้อมูล

4.1.7 วงจรมอดูเลตความถี่

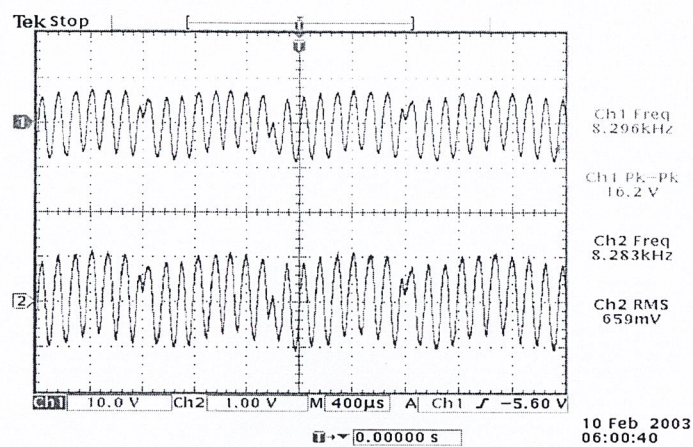
สัญญาณ BPSK รวมกับสัญญาณนำร่อง แล้วไปมอดูเลตแบบการมอดูเลตความถี่เพื่อส่งออกอากาศ

4.2 เครื่องรับ

เมื่อเครื่องส่ง ส่งสัญญาณข้อมูลมายังเครื่องรับ โดยผ่านตัวกลางคืออากาศ ทำการวัดสัญญาณตามจุดต่าง ๆ ได้ดังนี้

4.2.1 วงจรดีมอดูเลตความถี่

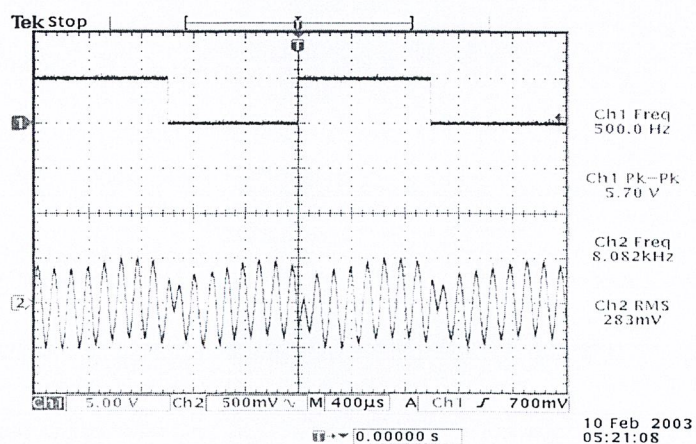
สัญญาณที่ตีเทคได้ก่อนที่จะเข้าวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและรับจะเหมือนกัน



รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ภาคส่งเทียบกับสัญญาณที่ภาครับ รับได้

Channel 1 เป็นสัญญาณ BPSK ที่ภาคส่ง

Channel 2 เป็นสัญญาณ BPSK ที่ภาครับ



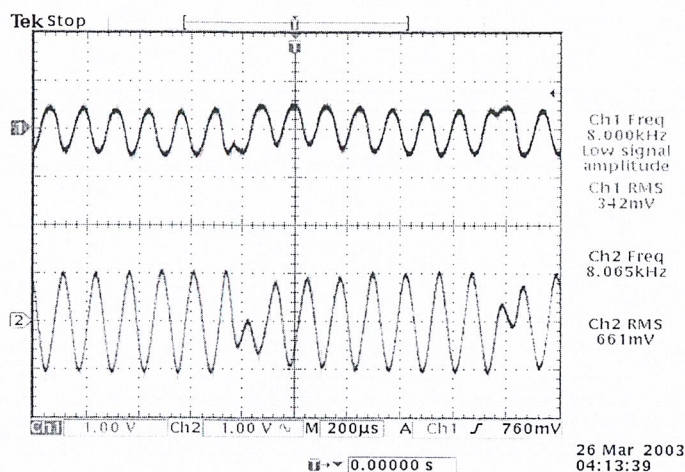
รูปที่ 4.10 สัญญาณข้อมูลของภาคส่งเทียบกับสัญญาณ BPSK ที่ภาครับ รับได้

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูลของภาคส่ง

Channel 2 เป็นสัญญาณ BPSK ที่ภาครับ

สัญญาณที่รับได้จะถูกวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน อยู่ 2 วงจร คือ วงจรกรองแถบความถี่ 8 kHz และวงจรกรองแถบความถี่ 1 kHz เพื่อที่จะได้เป็นสัญญาณอินพุตป้อนในหัววงจรเฟสล็อกคูลูปและได้เป็นสัญญาณพาหะออกมาที่เอาต์พุตก่อนส่งเป็นสัญญาณพาหะให้วงจรดีมอดูเลตต่อไป

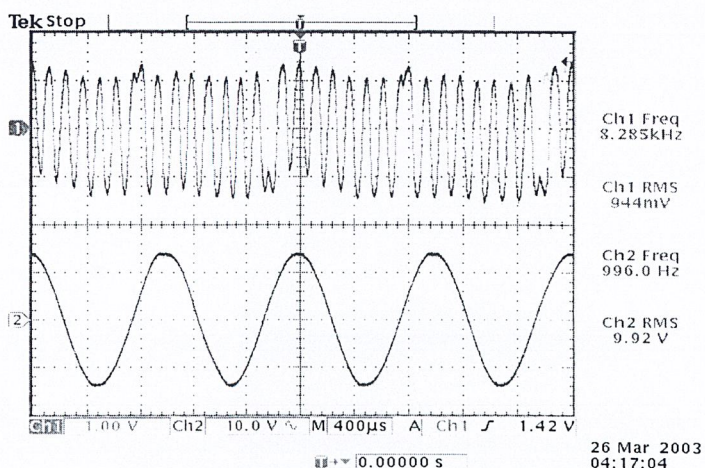
4.2.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 8 kHz



รูปที่ 4.11 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ 8 kHz
Channel 1 เป็นสัญญาณ BPSK ที่รับได้จากเอาต์พุตเครื่องรับเอฟเอ็ม
Channel 2 เป็นสัญญาณ BPSK ที่ผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

4.2.4 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz

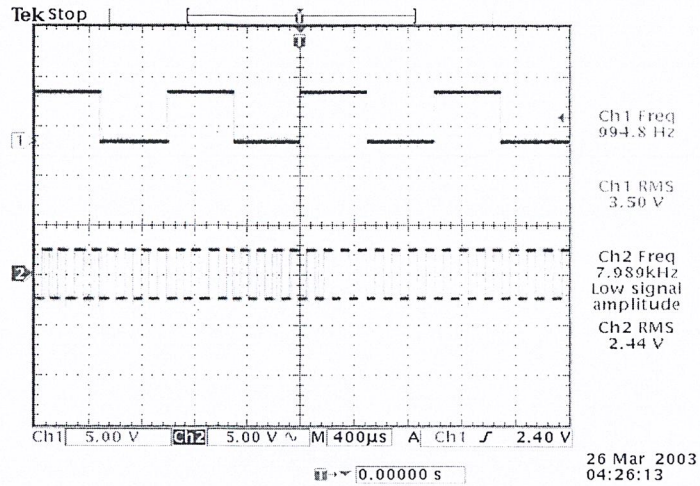
สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการที่จะตีเทคข้อมูลกับคืนมาได้ถูกต้อง



รูปที่ 4.12 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 1 kHz
Channel 1 เป็นสัญญาณ BPSK ที่ภาครับรับได้
Channel 2 เป็นสัญญาณนำร่องที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

4.2.5 วงจรเฟสล็อกคูล

สัญญาณเอ้าท์พุทที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่านจะเป็นอินพุทให้กับวงจรเฟสล็อกคูล เพื่อที่จะทำเป็นสัญญาณพาหะส่งไปที่วงจรดีมอดูเลต



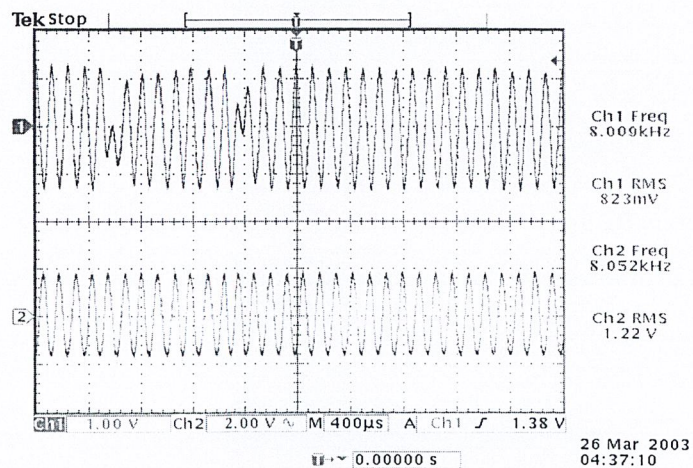
รูปที่ 4.13 สัญญาณเอ้าท์พุทที่ได้จากวงจรเฟสล็อกคูล

Channel 1 เป็นสัญญาณพัลส์นำร่อง 1 kHz

Channel 2 เป็นสัญญาณเอ้าท์พุทของวงจรเฟสล็อกคูล

4.2.6 วงจรดีมอดูเลตแบบ BPSK

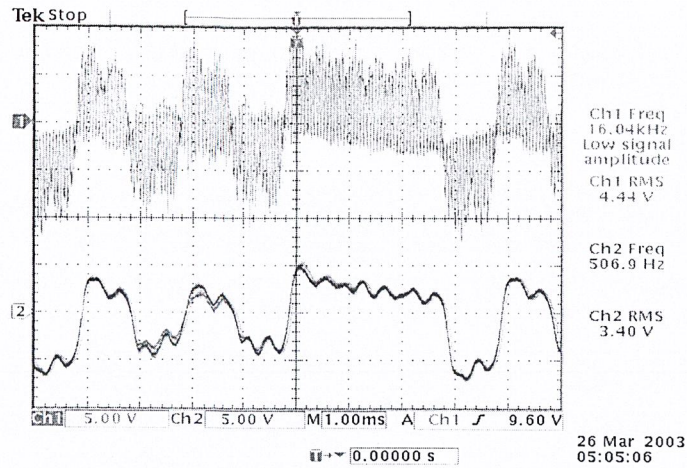
เป็นการนำสัญญาณพาหะคูณกับสัญญาณข้อมูลที่รับได้



รูปที่ 4.14 สัญญาณอินพุทของวงจรดีมอดูเลต

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูล

Channel 2 เป็นสัญญาณคลื่นพาหะ



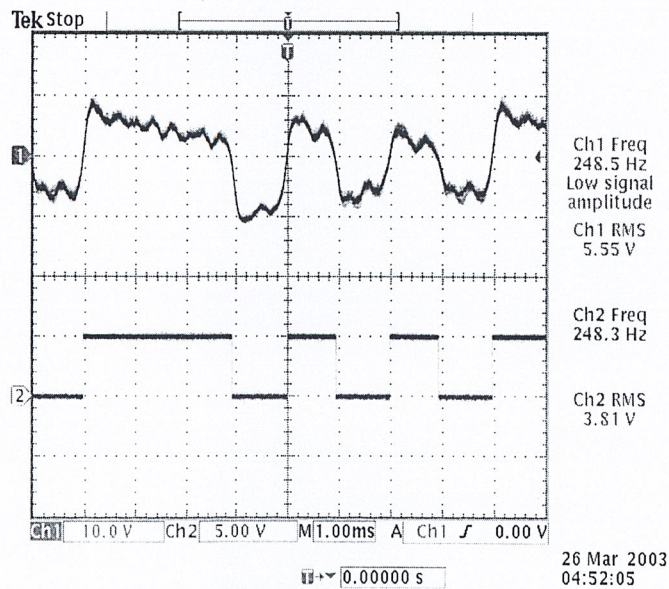
รูปที่ 4.15 สัญญาณเข้าที่พุดวงจรดีมอดูเลตเทียบกับสัญญาณเข้าที่ผ่านวงจร โลพาสฟิลเตอร์

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูลที่เข้าที่พุดวงจรดีมอดูเลต

Channel 2 เป็นสัญญาณเข้าที่พุดของวงจร โลพาสฟิลเตอร์

4.2.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

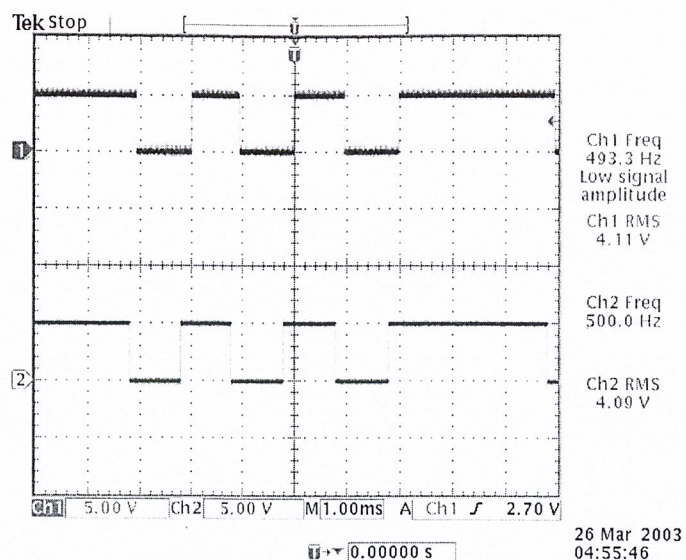
สัญญาณที่ผ่านวงจรมอดูเลตจะต้องส่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนที่เข้าวงจรแปลงโพลาร์เป็นยูนิโพลาร์



รูปที่ 4.16 สัญญาณเข้าที่พุด LPF เทียบกับสัญญาณเข้าที่พุดวงจรแปลง โพลาร์เป็นยูนิโพลาร์

Channel 1 เป็นสัญญาณเข้าที่พุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

Channel 2 เป็นสัญญาณยูนิโพลาร์



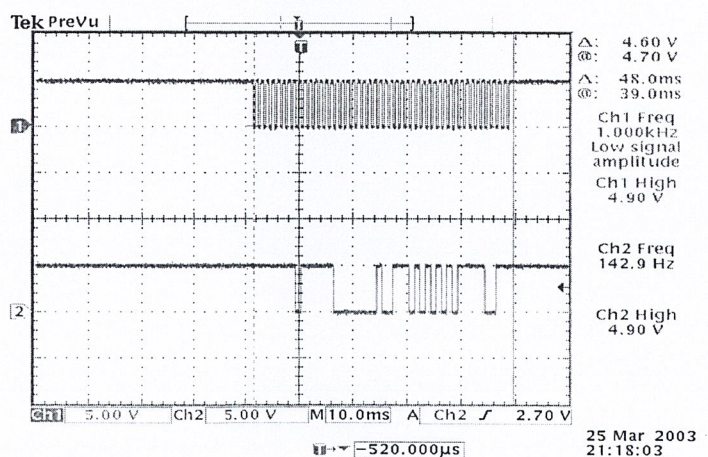
รูปที่ 4.17 สัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้เทียบกับสัญญาณข้อมูลที่ส่ง

Channel 1 เป็นสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้

Channel 2 เป็นสัญญาณข้อมูลที่ส่ง

4.3 สัญญาณรบกวน

ที่ป้ายรถเมล์จะส่งสัญญาณรบกวนออกไปเป็นจังหวะเพื่อส่งให้รถเมล์และรถเมล์สามารถรับสัญญาณรบกวนและรถเมล์สามารถส่งข้อมูลกับมาได้



รูปที่ 4.18 สัญญาณนาฬิกาเทียบกับสัญญาณรบกวน

Channel 1 เป็นสัญญาณนาฬิกา

Channel 2 เป็นสัญญาณรบกวน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 เครื่องส่ง

การทดลองจะแยกทดลองทีละวงจรเสร็จแล้วจึงนำมาประกอบรวมกันซึ่งสามารถสรุปผลแต่ ละวงจรได้ดังนี้

5.1.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

จะกำเนิดข้อมูลและสัญญาณนาฬิกาออกมาโดยสัญญาณที่ได้จะมีความเที่ยงตรงสูง

5.1.2 วงจรกำเนิดสัญญาณคลื่นพาหะ 8 kHz

ในวงจรนี้จะรับสัญญาณนาฬิกาเข้ามาเพื่อสร้างสัญญาณคลื่นพาหะโดยใช้เฟสล็อกคลุคูณ ความถี่ 8 เท่า วงจรนี้จะค่อนข้างยากในการปรับให้เฟสล็อกคลุคูณอยู่ในสภาวะล็อก จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการออกแบบเลือกค่าอุปกรณ์ให้เหมาะสม เพื่อให้สัญญาณเข้าที่พุดออกมาแล้วผ่านวงจรกรองช่วงความถี่ ผ่าน วงจรกรองช่วงความถี่ผ่านนี้จะใช้วงจรกรองช่วงความถี่ผ่านป้อนกลับแบบลบกำลังสอง แบบแบนด์ แทบ ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก

5.1.3 วงจรแปลงสัญญาณจากยูนิโพลาร์เป็นโพลาร์

เนื่องจากสัญญาณข้อมูลที้ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณที่มีระดับเป็นศูนย์ และหนึ่งดังนั้นก่อนเข้าวงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์จำเป็นต้องแปลงสัญญาณเป็นสองระดับสัญญาณนั่นคือ ระดับสัญญาณลบหนึ่งและบวกหนึ่งซึ่งใช้วงจรออปแอมป์ในการออกแบบซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก

5.1.4 วงจรปรับระดับสัญญาณ

วงจรส่วนนี้จะปรับระดับสัญญาณคลื่นพาหะกับข้อมูลให้มีค่าเหมาะสมก่อนเข้าวงจรมอดูเลเตอร์ ดังนั้นจะใช้ค่าความต้านทานปรับละเอียดมากในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดก่อนเข้าวงจรมอดูเลเตอร์

5.1.5 วงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์

จะทำหน้าที่คูณสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณคลื่นพาหะเพื่อให้ได้สัญญาณเป็น ไบนารีเฟสซิป คี้อย่างยิ่งจากการออกแบบและวัดสัญญาณจะได้สัญญาณมีความสมบูรณ์มาก

5.1.6 วงจรรวมสัญญาณนำร่อง 1 kHz กับสัญญาณไบนารีเฟสซิปคี้อยิ่ง

วงจรนี้จะใช้ค่าความต้านทานปรับค่าได้ปรับขนาดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเพื่อให้ได้ สัญญาณที่รับได้มีค่าเหมาะสมโดยการปรับค่าขนาดสัญญาณนำร่องให้มีขนาดต่ำๆ

5.1.7 วงจรส่งสัญญาณออกอากาศโดยใช้เครื่องส่งเอฟเอ็ม

วงจรส่วนนี้จะใช้เครื่องส่งสำเร็จรูปเพื่อ่ายในการใช้งาน และปรับแต่งได้สะดวก

5.2 เครื่องรับ

5.2.1 วงจรกรองความถี่นำร่อง

วงจรในส่วนนี้จะมีความสำคัญมากในเครื่องรับ เนื่องจากจะทำให้ภาคเครื่องส่งและรับทำงานสัมพันธ์กัน ข้อมูลที่รับได้จึงจะถูกต้อง วงจรส่วนนี้จะกรองสัญญาณออกมาค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงทำการเพิ่มกำลังของวงจรกรองช่วงความถี่ เพื่อให้ได้สัญญาณนำร่องที่ถูกต้อง

5.2.2 วงจรกรองช่วงความถี่พาห้

จะใช้วงจรกรองช่วงความถี่คลื่นพาห้นี้จะใช้วงจรเหมือนเครื่องส่ง

5.2.3 วงจรกรองช่วงความถี่สัญญาณ ไบนารีเฟสซิปตี้ยั้ง

สัญญาณอินพุตที่รับเข้ามาจะมีสองสัญญาณคือสัญญาณไบนารีเฟสซิปตี้ยั้งและสัญญาณนำร่องดังนั้นจะต้องกรองเอาเฉพาะสัญญาณไบนารีเฟสซิปตี้ยั้งเพื่อนำ ไปคิมอูลูเลตต่อไป

5.2.4 วงจรกู้สัญญาณพาห้ 8 kHz

วงจรนี้จะใช้วงจรเฟสล็อกูปเหมือนกับวงจรด้านเครื่องส่งทุกอย่างแต่จะมีปัญหาที่สัญญาณนำร่องจะมีค่าแอมพลิจูด มีค่าไม่คงที่ทำให้ความถี่สัญญาณคลื่นพาห้ที่กู้กลับมาไม่ค่าเบี่ยงเบนทำให้ข้อมูลค่าผิดพลาด

5.2.5 วงจรคิมอูลูเลเตอร์

วงจรนี้จะต้องการแรงดันอินพุตที่มีค่าต่ำมากดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับระดับแรงดันอินพุตที่มีค่าสูงให้มีค่าต่ำลง

5.2.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำนี้จะใช้วงจรแบบบัตเตอร์เวิร์คซึ่งใช้กำลัง 6 จะได้ผลที่น่าพอใจ

5.2.7 วงจรกู้สัญญาณข้อมูล

วงจรนี้จะใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแบบง่ายๆ โดยใช้อปแอมป์

5.2.8 วงจรเครื่องรับสัญญาณเอฟเอ็ม

วงจรส่วนนี้จะใช้วงจรสำเร็จรูปต่างๆ ไปในการรับสัญญาณ

ปัญหาที่พบที่ภาครับสัญญาณ

คือสัญญาณที่รับได้จะมีค่าขาดๆ หายๆ ทำให้เป็นการยากในการกู้ข้อมูลได้ถูกต้องเนื่องจากสัญญาณนำร่องที่กู้ได้มีค่าแอมพลิจูดไม่คงที่และเมื่อไม่มีการส่งข้อมูลจะมีสัญญาณรบกวนมาก

หนังสืออ้างอิง

- (1) Robert F.Coughlin and Frederick F.Driscoll, "Operation Amplifiers & Linear Integrated Circuit", fifth edition, Prentice – Hall international, 1997
- (2) Ramakant A. Gangkwad, "Op – Amp and Linear Intergrated Circuit", second edition, Prentice – Hall international, 1983
- (3) Royal E. Best, "Phase – Locklooped", third edition, McGraw – Hill, 1997