สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องสั่งอาหารไร้สาย

WIRELESS FOOD ORDERING EQUIPMENT

โดย

นางสาวกมลชนก ชมสา

นายเจษฎา ศรีสนธิ์

ปริญญาณนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

วศ.
ก136ค
2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 50090
วัน,เดือน,ปี 21 เม.ย. 2547

b.....1413ก40
i.....

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องสั่งอาหารไร้สาย

WIRELESS FOOD ORDERING EQUIPMENT

โดย

นางสาวกมลชนก ชมสา 42010002

นายเจษฎา ศรีสนธิ์ 42010064

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องสั่งอาหารแบบไร้สาย

Wireless food ordering equipment

ผู้จัดทำ

1.นางสาวกมลชนก ชมสา 42010002

2.นายเจษฎา ศรีสนธิ์ 42010064

ปราโมทย์ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

(รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องสั่งอาหารแบบไร้สาย

Wireless food ordering equipment

ผู้จัดทำ 1: นางสาวกมลชนก ชมสา 42010002

2: นายเจษฎา ศรีสนธิ์ 42010064

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและประดิษฐ์เครื่องสั่งอาหารแบบไร้สาย เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ลูกค้า โดยไม่ต้องสั่งอาหารผ่านบริกรสร้างความถูกต้อง รวดเร็วให้กับการสั่งอาหาร วิธีการคือ ให้ลูกค้าป้อนรหัสอาหารที่ต้องการสั่งเข้าสู่เครื่องสั่งอาหาร ซึ่งมีจอในการแสดงผล แล้วเครื่องจะทำการส่งข้อมูลไปยังเครื่องรับรายการอาหารโดยวิธีการไร้สาย แล้วทำการส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผล ทำบิล และตรวจสอบจำนวนวัตถุดิบในการประกอบอาหารที่คงเหลืออยู่ได้

Abstract

This thesis is to study and invent the Wireless food ordering equipment. Foods would be ordered by just key food codes on keypad.The result would be displayed on LCD monitor. The above stated codes would then be sent to reciever terminal by the wireless system.Accordingly more over, ingredients quantily could accurately be checked to save your worthly time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051	3
2.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของ 8051	4
2.1.2 โครงสร้างภายในของ 8051	5
2.2 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD	5
2.3 การสื่อสารข้อมูล (Data Communication)	8
2.4 การส่งผ่านข้อมูล(Transmission modes)	8
2.5 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS 232	10
2.6 โพล และ ซีเลคท์	12
2.7 การมอดูเลตแบบฟรีเควนซีชิพท์คีย์อิ้ง (Frequency Shift Keying)	14
2.8 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation : FM)	19
2.9 ระบบเฟสล็อกลูป	25
2.10 ระบบสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกลูป	32
2.10.1 วิเคราะห์วงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร	34
2.11 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกลูปแบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส	38
2.12 วงจรภาคไอเอฟและดีมอดูเลเตอร์	39
2.13 วงจร LOW PASS FILTER	40
2.14 การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตอนุกรม	41
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	44
3.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	44
3.2 วงจรเชื่อมต่อ MAX 232 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	44
3.3 วงจรฟรีเควนซีชิพคีย์อิ้งมอดูเลเตอร์ (Frequency Shift Keying Modulation)	45
3.4 วงจรฟรีเควนซีชิพคีย์อิ้งดีมอดูเลเตอร์ (Frequency Shift Keying Demodulation)	47
3.5 ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบที่ใช้เฟสล็อกลูป	51
3.5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (VCO)	52
3.5.2 วงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส	53
3.5.3 วงจรเปรียบเทียบเฟส	53
3.5.4 วงจรลูปฟิลเตอร์	57
3.6 วงจรเอฟเอ็มดีเทคเตอร์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบวงจร BUTTERWORTH LOWPASS FILTER 62
3.8 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ 65
3.9 การออกแบบระบบเครื่องสั่งอาหาร 65
3.10 รูปวงจรรวม 67
บทที่ 4 ผลการทดลอง 68
4.1 วงจรเอฟเอสเคมอดูลเลเตอร์ 68
4.2 วงจรเอฟเอสเคดีมอดูเลเตอร์ 69
4.3. ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกลูป 70
4.3.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 70
4.3.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์ 74
4.3.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องรับที่มีความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์ 77
4.3.4 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์ 81
4.4 การมอดูเลตทางความถี่ 83
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณข่าวสาร
กับสเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็ม 83
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณข่าวสาร
กับสเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็ม 84
4.4.3 ผลของสเปกตรัมจากการมอดูเลตที่ความถี่ 135.7 MHz 85
4.4.4 ผลของสเปกตรัมจากการมอดูเลตที่ความถี่ 136.7 MHz 86
4.5 ผลการทดลองวงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier) 87
4.6 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ 87
4.7 วงจรเอฟเอ็มดีเทกเตอร์ 89
4.8 แสดงผลการส่งและรับสัญญาณ โดยวิธีการไร้สาย 92
4.9 คุณสมบัติของสายอากาศ 93
4.10 ขั้นตอนการทำงานของระบบ 94
4.11 การแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ 95
4.12 Flowchart Master 98
4.13 Flowchart Slave 99
4.14 Flowchart Interrupt 100
4.15Flowchart การแสดงผล 101
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ 102

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบรวม 1

รูปที่ 1.2 แสดงบล็อคไดอะแกรมการแปลงสัญญาณและมอดูเลตทางความถี่ด้านส่ง 2

รูปที่ 1.3 แสดงบล็อคไดอะแกรมการแปลงสัญญาณและดีมอดูเลตทางความถี่ด้านรับ 2

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงหน่วยการทำงานพื้นฐานของ MCS-51 3

รูปที่ 2.2 แสดงการจัดการขาของไอซี 8051 4

รูปที่ 2.3 รูป MAX232 และโครงสร้างภายในของ MAX232 11

รูปที่ 2.4 คอนเน็กเตอร์ 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากหลังคอมพิวเตอร์) 11

รูปที่ 2.5 แสดงลำดับการทำงานของโพลและซีเลคท์ 14

รูปที่ 2.6 ลักษณะของสัญญาณเอฟเอสเค 15

รูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต 16

รูปที่ 2.8 การเบี่ยงเบนความถี่ของเอฟเอสเค 17

รูปที่ 2.9 สัญญาณเอฟเอ็ม 19

รูปที่ 2.10 แอมปลิจูดของคลื่นพาห์และไซด์แบนด์ของการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม 24

รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของคลื่นมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม เมื่อ $m_f =$ 0.5, 1, 2.5 และ 4.0 24

รูปที่ 2.12 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่เท่ากัน 25

รูปที่ 2.13 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุตไม่เท่ากัน 26

รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกลูป 33

รูปที่ 2.15 วงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร์ 34

รูปที่ 2.16 วงจรสมมูล AC π - Model ของวงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร์ 35

รูปที่ 2.17 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกลูปแบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส 38

รูปที่ 2.18 แสดงแผนผังของไอซีเบอร์ 13135 40

รูปที่ 3.1 แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับคีย์แพดและโมดูลแอลซีดี 44

รูปที่ 3.2 วงจรเชื่อมต่อ MAX232 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์
และไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 45

รูปที่ 3.3 บล็อคไดอะแกรมของไอซีเบอร์ XR2206 45

รูปที่ 3.4 วงจรไอซีเบอร์ XR2206 47

รูปที่ 3.5 บล็อคไดอะแกรมของไอซีเบอร์ XR2211 48

รูปที่ 3.6 วงจรของไอซีเบอร์ XR2211 50

รูปที่ 3.7 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณปรับความถี่ได้ตามแรงดันควบคุม (VCO) 53
รูปที่ 3.9 การต่อวงจรของไอซี MC 12017 53
รูปที่ 3.10 การโปรแกรมตัวหารความถี่ 56
รูปที่ 3.11.การเซตขาต่างๆของไอซีเบอร์ MC 145152-2 เมื่อสังเคราะห์
ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 56
รูปที่ 3.12 วงจรลูปฟิลเตอร์ 58
รูปที่ 3.13 วงจรลูปฟิลเตอร์ของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 59
รูปที่ 3.14 แสดงแผนผังของไอซีเบอร์ 13135 62
รูปที่ 3.15 วงจร Low pass filter 64
รูปที่ 3.16 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ 65
รูปที่ 3.17 วงจรรวมทางด้านตัวแม่(ต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์) 67
รูปที่ 3.18 วงจรรวมทางด้านตัวลูก(ต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์) 68
รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์ 68
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์ 69
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่เข้า FSK Modulation 69
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ
135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 71
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ทางด้านส่ง 72
รูปที่ 4.6 แสดงเอาท์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD 72
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณเอาท์พุตที่ออกจากวงจรลูปฟิลเตอร์ 73
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 73
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ
136.7 เมกกะเฮิรตซ์ 75
รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ทางด้านส่ง 75
รูปที่ 4.11 แสดงเอาท์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD 76
รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ 76
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ
125 เมกกะเฮิรตซ์ 78
รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ทางด้านรับ 78
รูปที่ 4.15 แสดงเอาท์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD 79
รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์ 79
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ
126 เมกกะเฮิรตซ์ 81
รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ทางด้านรับ 81

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 แสดงเอาท์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD 82
รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์ 82
รูปที่ 4.21 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3 แอมปลิจูด50mV 83
รูปที่ 4.22 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด100 mV 83
รูปที่ 4.23 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด50mV 84
รูปที่ 4.24 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่10 kHz แอมปลิจูด50mV 84
รูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์
ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 2.4 kHz 85
รูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์
ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 5.4 kHz 85
รูปที่ 4.27 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์
ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 2.4 kHz 86
รูปที่ 4.28 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์
ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 5.4 kHz 86
รูปที่ 4.29 แสดงกราฟคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน 87
รูปที่ 4.30 กราฟคุณสมบัติของวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ 87
รูปที่ 4.31 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับ
ขณะยังไม่ผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ ที่ความถี่ 135.7 MHz -40 dBm 89
รูปที่ 4.32 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับ
เมื่อผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ ที่ความถี่ 135.7 MHz -29 dBm 89
กับสัญญาณที่เอาต์พุตของ IC13135 88
รูปที่ 4.33 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ 90
รูปที่ 4.34 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 455 กิโลเฮิรตซ์ 90
รูปที่ 4.35 แสดงคุณสมบัติของวงจรLow pass Filter 91
รูปที่ 4.36 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์ความถี่ 2.4 กิโลเฮิรตซ์
กับสัญญาณที่เอาต์พุตของ IC13135 91
รูปที่ 4.37 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์ความถี่ 5.4 กิโลเฮิรตซ์
กับสัญญาณที่เอาต์พุตของ IC13135 92
รูปที่ 4.38 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบเมื่อส่งอักษร “A” จากไมโครคอนโทรลเลอร์
และสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.39 แสดงขั้นตอนแรกของการทำงานของเครื่องสั่งอาหาร 93
รูปที่ 4.40 แสดงหน้าจอขณะทำการสั่งอาหาร 94
รูปที่ 4.41 แสดงหน้าจอขณะทำการส่งรายการอาหาร 94
รูปที่ 4.42 แสดงหน้าจอเมื่อได้รับสัญญาณยืนยันการรับรายการอาหารเรียบร้อยแล้ว 94
รูปที่ 4.43 แสดงวิธีการเรียกดูใบสั่งอาหาร 95
รูปที่ 4.44 แสดงใบรายการอาหารโต๊ะที่ 2 96
รูปที่ 4.45 แสดงวิธีการเรียกดูใบสั่งอาหาร 96
รูปที่ 4.46 แสดงปริมาณเครื่องปรุงอาหารที่เหลืออยู่ 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

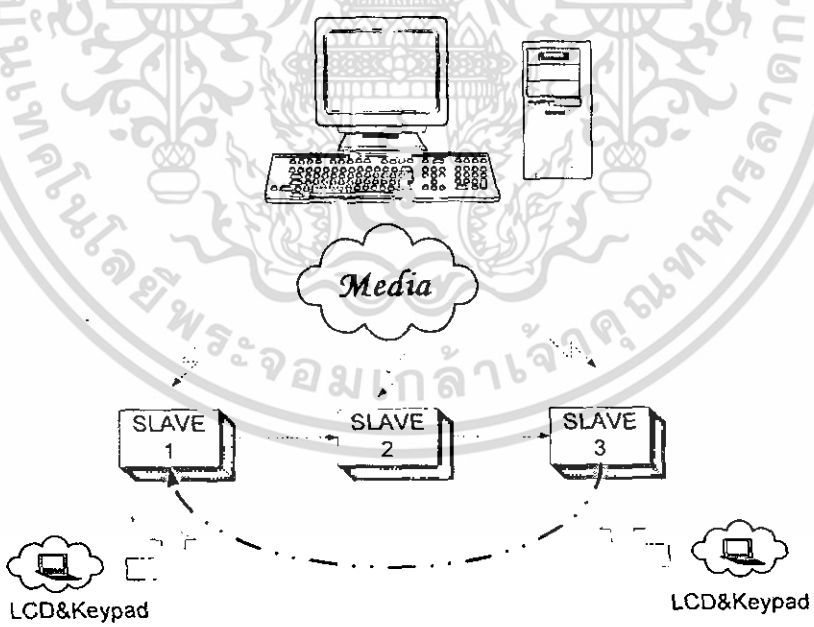
	หน้า
ตารางที่ 2.1 การกระจายคลื่นพาหะและไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตต่าง ๆ	23
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และค่าความต่างศักย์ของวีซีโอความถี่ 135.7 MHz	70
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่ 136.7 MHz	74
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่ 125 MHz	77
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการออส์ซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่126 MHz	80
ตารางที่ 4.5 ตารางคุณสมบัติของวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีต่างๆเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราอย่างมาก เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกให้กับเรา พร้อมทั้งก่อให้เกิดความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการทำงานต่างๆ จากความต้องการเหล่านี้จึงได้มีความคิดในการประดิษฐ์เครื่องสั่งอาหารไร้สายขึ้นมา

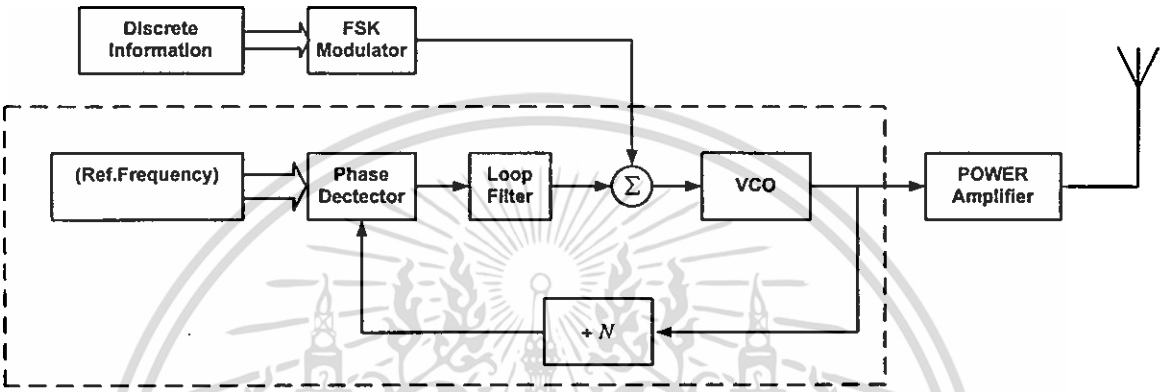
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาและจัดสร้างเครื่องสั่งอาหารไร้สาย(Wireless Food Ordering Equipment) โดยลักษณะการทำงานคือ เครื่องสั่งอาหารจะถูกวางไว้บนโต๊ะอาหาร เมื่อมีลูกค้าเข้ามายังร้านอาหารและนั่งที่โต๊ะ ก็จะทำการเลือกรายการอาหารจากเมนูที่วางอยู่บนโต๊ะ โดยในเมนูนี้จะมีรหัสรายการอาหารแต่ละชนิดอยู่ จากนั้นลูกค้าจะทำการสั่งอาหารโดยกดหมายเลขรหัสอาหารลงในเครื่องสั่งอาหาร ซึ่งเมื่อกดรหัสตามรายการอาหารและจำนวนรายการที่ต้องการสั่งแล้ว บนหน้าจอของเครื่องสั่งอาหารจะแสดงชื่อและราคาของรายการอาหารที่ได้ทำการกดลงไปซึ่งเมื่อกดรหัสตามรายการอาหารและจำนวนรายการที่ต้องการสั่งแล้ว ผู้สั่งจะต้องกดปุ่มอีกครั้งเพื่อทำการส่งรายการอาหารไปยังตัวรับ และจะทำการแสดงผลยังหน้าจอคอมพิวเตอร์ ที่เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการแสงผลโดยอาศัยการทำงานของโปรแกรมวิชวลเบสิก (Visual Basic) เมื่อคอมพิวเตอร์ทำการรับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ก็จะทำการส่งสัญญาณกลับมายังตัวส่ง และที่จอของเครื่องสั่งอาหารไร้สายจะแสดงข้อความขอบคุณ เป็นอันเสร็จการทำงาน



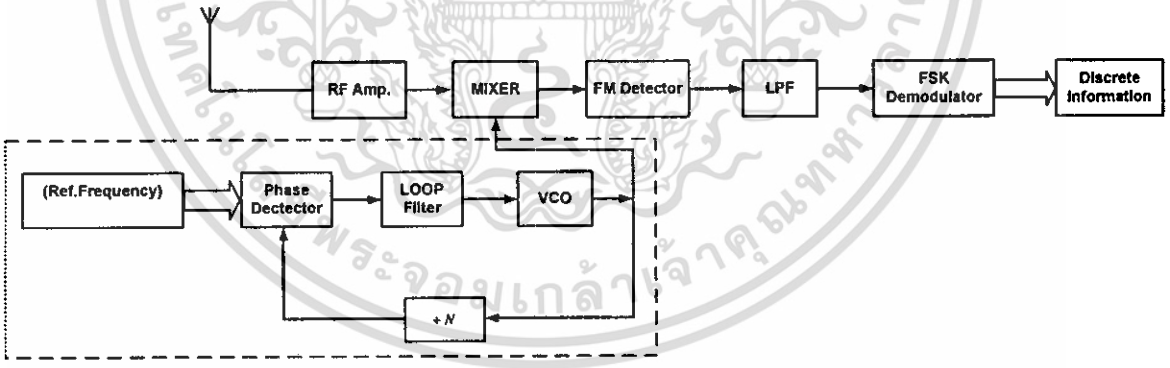
รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการส่งสัญญาณดิจิตอลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ออกอากาสต้องทำการแปลงให้เป็นสัญญาณอนาลอคแล้วทำการมอดูเลตกับความถี่สูงเพื่อส่งออกอากาศได้



รูปที่ 1.2 แสดงบล็อคไดอะแกรมการแปลงสัญญาณและมอดูเลตทางความถี่ด้านส่ง



รูปที่ 1.3แสดงบล็อคไดอะแกรมการแปลงสัญญาณและดีมอดูเลตทางความถี่ด้านรับ

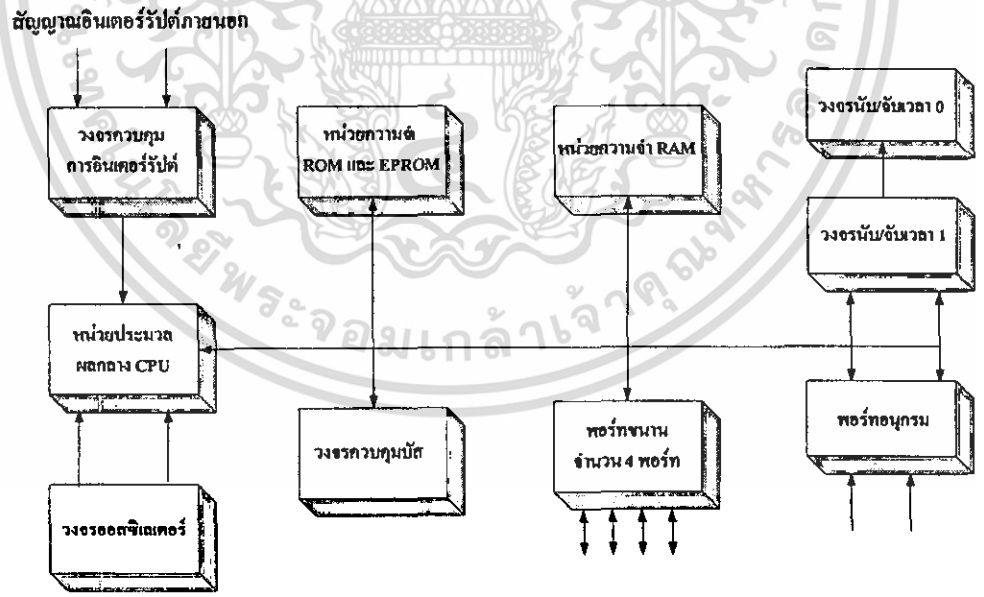
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 8051

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นโปรเซสเซอร์ประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบควบคุมขนาดเล็ก โดยภายในไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งประกอบด้วยหน่วยการทำงานหลักของระบบคอมพิวเตอร์ครบถ้วน เช่น หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) หรือ หน่วยความจำ พอร์ตในการติดต่ออุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งหากว่าเป็นการใช้งานโปรโครเซสเซอร์ทั่วไป ก็จะต้องใช้ไอซีภายในนอกมาประกอบเพื่อทำหน้าที่เหล่านี้ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าไมโครคอนโรลเลอร์เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่ทำงานควบคุมได้สมบูรณ์โดยบรรจุอยู่ในตัวไอซีเพียงตัวเดียวเท่านั้น ในบางครั้งจึงอาจมีการเรียกไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าเป็น ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ชิบเดี่ยว (1 chip microcomputer)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ หลายรุ่น ซึ่งมีสถาปัตยกรรมพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดหรือจำนวนของหน่วยทำงานภายในที่ต่างกันออกไปเพื่อความเหมาะสมในงานประยุกต์ต่างๆ ตามความต้องการ โดยมีทั้งลักษณะที่ใช้เทคโนโลยีการผลิตไอซีวงจรรวมความสูงมาก (LSI)



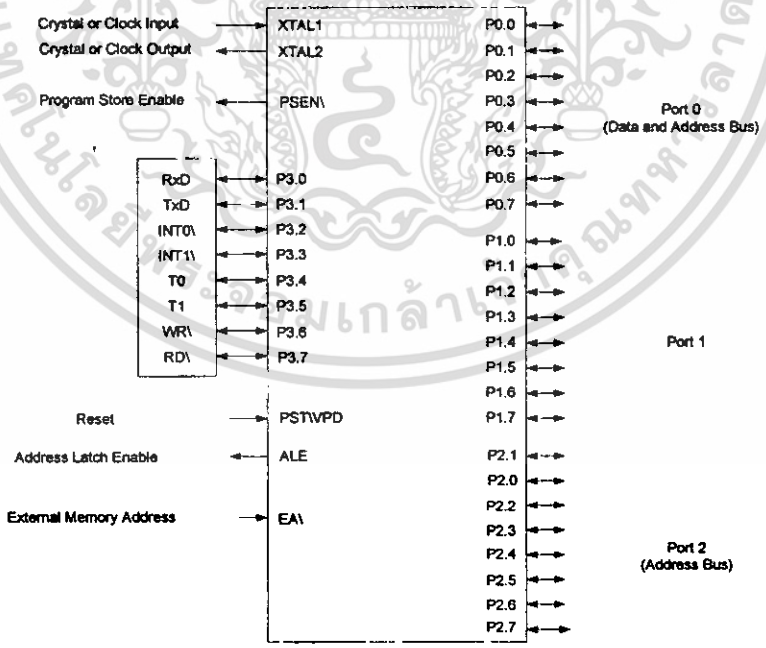
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงหน่วยการทำงานพื้นฐานของ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คุณลักษณะพื้นฐานของ 8051

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงหน่วยการทำงานพื้นฐาน ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ต่างๆ ที่จัดอยู่ภายในตระกูล นี้ประกอบด้วย

- หน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต
- หน่วยประมวลผลสำหรับข้อมูลแบบบิต
-.ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม 64 กิโลไบต์
-.ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูล 64 กิโลไบต์
-.หน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์ แบบ หรือ
-.หน่วยความจำแบบ ภายในจำนวน 128 กิโลไบต์
-.พอร์ตรับ/ส่ง แบบขนานจำนวน 32 เส้น ซึ่งสามารถแยกทำงานได้อย่างอิสระ
-.วงจรนับ/จับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 2 วงจร
-.วงจรสื่อสารแบบอนุกรมแบบฟูลดูเพลกซ์
-.วงจรควบคุมการอินเตอร์รัปต์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 6 ประเภท พร้อมกำหนดค่าความสำคัญได้ 2 ระดับ
- วงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน



รูปที่ 2.2 แสดงการจัดการขาของไอซี 8051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมากแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ มักจะมีรูปร่างไอซีเป็นแบบ 40 ขา ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละขาสัญญาณจะทำหน้าที่ระบุชัดเจนตามสัญลักษณ์ ชื่อย่อที่กำกับแต่ละขา แต่ในบางขาสัญญาณอาจจะทำหน้าที่ได้มากกว่า 1 หน้าที่ (ระบุอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม) ซึ่งจะไม่สามารถใช้งานในเวลาเดียวกันได้

2.1.2 โครงสร้างภายในของ 8051

ไมโครคอนโทรลเลอร์8051 ประกอบด้วยหน่วยการทำงานต่างๆ ภายในไอซีโดยแต่ละชุด ซึ่งเป็นวงจรควบคุม รีจีสเตอร์ (Register) หรือ หน่วยความจำภายในของ 8051 จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยผ่านทางเส้นสัญญาณที่เรียกว่าบัสข้อมูลภายในรีจีสเตอร์และหน่วยความจำเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในระหว่างทำการประมวลผลคำสั่ง หน้าที่ของโปรแกรมที่ผู้ใช้งานได้สร้างขึ้นมาก็เป็นการควบคุมการรับหรือส่งข้อมูลระหว่างรีจิสเตอร์เหล่านี้ ซึ่งอาจจะมีการดำเนินการร่วมกับหน่วยดำเนินการประมวลผลทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU : Arithmetic and Logic Unit) ด้วย

2.2 คำสั่งควบคุมโมดูล LCD

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม แน่นอนว่าต้องกำหนดให้ขา RS และ R/W เป็น "0" แล้วเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งควบคุมโมดูล LCD ของชิปควบคุม HD44780 ที่สำคัญมี 10 คำสั่งดังนี้

1. **คำสั่งเคลียร์ตัวแสดงผล (Clear display)**

มีข้อมูลคำสั่งเป็น 01H เป็นคำสั่งที่ใช้เขียนข้อมูลช่องว่าง หรือ space เข้าไปใน DDRAM ทั้งหมด เมื่อตัวควบคุมเอ็กซิคิวต์คำสั่งนี้ จะทำการกำหนดแอดเดรสของ DDRAM เป็น 0 เคอร์เซอร์จะกลับไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของจอแสดงผล แล้วเซตบิต I/D ให้เป็น "1"

2. **คำสั่ง (Return home)**

ต้องกำหนดให้บิต1ของข้อมูลเป็น"1"เป็นคำสั่งให้เคอร์เซอร์เคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งซ้ายสุดของจอแสดงผล แต่ข้อมูลบนจอแสดงผลไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ ข้อมูลคำสั่งของคำสั่งนี้จะเป็น 02H หรือ 03H ก็ได้

3. **คำสั่งเลือกโหมดการป้อนข้อมูล (Entry mode set)**

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่ง ดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	0	0	1	I/D	S

- บิต S เป็นบิตที่ใช้ในการกำหนดลักษณะของการแสดงผล เมื่อมีการป้อนข้อมูล ถ้าหากบิต S เป็น "1" เมื่อเกิดข้อมูลใหม่บนจอแสดงผล ตัวเคอร์เซอร์จะอยู่กับที่ แต่ตัวอักษรข้อมูลเดิมจะถูกดันไปทางซ้าย แต่ถ้าหากบิตนี้เป็น "0" เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ตัวเคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บิต I/D เป็นบิตที่ใช้กำหนดว่า เมื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลแล้ว แอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้นหรือลดลงหนึ่งแอดเดรส โดยถ้าบิตนี้เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเป็น "0" แอดเดรสจะลดลง ดังนั้นข้อมูลคำสั่งที่เกิดขึ้นสำหรับคำสั่งนี้ได้แก่ 04H – 07H (4 ข้อมูลคำสั่งและที่ใช้บ่อยคือ 06H หมายถึง กำหนดให้เมื่อเกิดข้อมูลใหม่ เคอร์เซอร์จะเลื่อนไปทางขวามือ และแอดเดรสของ DDRAM เพิ่มขึ้น

4. คำสั่งควบคุมการแสดงผล

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	0	1	D	C	B

- บิต D ใช้ควบคุมการเปิดปิดจอแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น "1" จะเป็นการเปิดจอแสดงผล ถ้าเป็น "0" จะเป็นการปิดจอแสดงผล

- บิต C ใช้ควบคุมการแสดงตัวเคอร์เซอร์บนจอแสดงผล ถ้าต้องการให้มีเคอร์เซอร์แสดงผลบนจอแสดง ต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น "1" ถ้ากำหนดให้เป็น "0" จะเป็นการปิดเคอร์เซอร์ หรือไม่แสดงเคอร์เซอร์

- บิต B ใช้ควบคุมการกระพริบของเคอร์เซอร์ ถ้าบิตนี้เป็น "1" เคอร์เซอร์จะกระพริบ ดังนั้นจะมีข้อมูลคำสั่งได้ตั้งแต่ 08H – 0FH (8 รูปแบบคำสั่ง) ที่ใช้บ่อยคือ 0CH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แต่ไม่แสดงเคอร์เซอร์ และ 0FH เป็นการสั่งให้เปิดจอแสดงผล แสดงเคอร์เซอร์และสั่งให้เคอร์เซอร์กระพริบ

5. คำสั่งควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และข้อมูลตัวอักษร

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	0	1	S/C	R/L	*	*

การควบคุมการเลื่อนเคอร์เซอร์และตัวอักษรบนจอแสดงผล ขึ้นอยู่กับการกำหนดบิต S/C และ R/L ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. คำสั่งกำหนดฟังก์ชันการทำงาน

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
0	0	1	DL	N	F	*	*

- บิต DL ใช้กำหนดจำนวนบิตที่ใช้ติดต่อส่งผ่านข้อมูล ถ้าบิตนี้เป็น "0" จะเป็นการติดต่อแบบ 4 บิต แต่ถ้าเป็น "1" จะเป็นแบบ 8 บิต

- บิต N ใช้กำหนดจำนวนบรรทัดของการแสดงผล ถ้าเป็น "0" จะแสดงผล 1 บรรทัด ถ้าเป็น "1" จะแสดงผล 2 บรรทัด ในกรณีที่จอแสดงผลสามารถแสดงได้มากกว่า 2 บรรทัด และต้องการให้แสดงผลมากกว่า 2 บรรทัดก็กำหนดบิต N นี้ให้เป็น "1" จุดที่น่าสังเกตคือ โมดูล LCD แบบ 16 ตัวอักษร 1 บรรทัด แม้จะมีบรรทัดการแสดงผลเพียง 1 บรรทัด แต่จะต้องกำหนด N ให้เป็น "1" เนื่องจากแอดเดรสของ DDRAM แบ่งเป็น 2 ช่องคือ 00H และ 40H

- บิต F ใช้เลือกความละเอียดของตัวอักษรในการแสดงผล ถ้าบิตนี้เป็น "0" จะเป็นการแสดงผลแบบ 5x7 จุด และถ้าเป็น "1" จะแสดงเป็นแบบ 5x10 จุด ข้อมูลคำสั่งที่ใช้บ่อยคือ 38H เป็นการกำหนดให้โมดูล LCD ทำงานแบบ 8 บิต แสดงผล 4 บรรทัด และเลือกความละเอียดเป็น 5x7 จุด

7. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ CGRAM

เมื่อต้องการกำหนดแอดเดรสของ CGRAM ต้องกำหนดให้บิต 7 เป็น "0" บิต 6 เป็น "1" ส่วนอีก 6 บิตที่เหลือจะแทนด้วยค่าแอดเดรสของ CGRAM จะต้องทำการกำหนดแอดเดรสด้วยคำสั่งนี้ ก่อนจะอ่านหรือเขียนข้อมูลให้ CGRAM โดยแอดเดรสของ CGRAM อยู่ระหว่าง

00H – 3FH

8. คำสั่งเลือกแอดเดรสของ DDRAM

ใช้ในการเลือกแอดเดรสของ DDRAM ก่อนที่จะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล โดยบิต7 ต้องเป็น "1" และข้อมูลอีก 7บิตที่เหลือจะเป็นคู่แอดเดรสของ DDRAM ซึ่งแอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 8CH – 0FFH ทั้งนี้จำนวนแอดเดรสยังขึ้นกับการกำหนดสถานะบิตที่ N ด้วย เป็น "0" แอดเดรสของ DDRAM จะอยู่ระหว่าง 80H – 0CFH และถ้าบิต N เป็น "1" แอดเดรสของ DDRAM จะมีสองช่วงคือ 8CH – 87H และ 0C0H – 0C7H

9. คำสั่งอ่านบิตซีแฟลกและแอดเดรส

มีรายละเอียดของรูปแบบข้อมูลคำสั่งดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิต7	บิต6	บิต5	บิต4	บิต3	บิต2	บิต1	บิต0
BF	A	A	A	A	A	A	A

เป็นคำสั่งที่ใช้อ่านบิตซีแฟลก (BF) โดยแฟลกนี้จะเป็นตัวบอกสถานะของตัวควบคุม LCD ว่าพร้อมจะรับข้อมูลอยู่หรือไม่ ถ้าหากบิต BF เป็น "0" แสดงว่าพร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง แต่ถ้าเป็น "1" แสดงว่าขณะนี้ตัวควบคุม LCD ยังอยู่ในกระบวนการทำงานภายในหรือกำลังประมวลผลข้อมูลอยู่ ยังไม่พร้อมรับข้อมูลหรือคำสั่ง เมื่อต้องการอ่านค่าแฟลกต้องกำหนดให้ขา R/W เป็น "1" ด้วย แต่สัญญาณที่ RS ยังต้องเป็น "0" อยู่เพราะข้อมูลนี้เป็นข้อมูลคำสั่ง นอกจากนี้ ยังใช้เป็นคำสั่งอ่านข้อมูล แอดเดรสของ CGRAM และ DDRAM ด้วย

2.3 การสื่อสารข้อมูล (Data Communication)

การสื่อสารข้อมูลข่าวสารที่ถูกเข้ารหัสแล้วระหว่างอุปกรณ์ 2 ชนิด โดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ คือ ผู้ส่งข่าวสาร ผู้รับสารและตัวการในการส่งผ่านข้อมูล โดยมีสิ่งที่ผู้ส่ง ส่งผ่านตัวกลางให้ผู้รับได้รับ คือ ข้อมูลข่าวสาร โดยมีรูปแบบของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ 2 ชนิด แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1.การสื่อสารทางเดียว (Simple) ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลที่อุปกรณ์แต่ละด้านจะเป็นเฉพาะตัวส่งหรือตัวรับเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ทำให้ทิศทางของการส่งผ่านข้อมูลมีทิศทางเดียว

2.การสื่อสารกึ่งสองทาง (Haft duplex) ใช้ในการติดต่อกันระหว่างอุปกรณ์ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารกัน อุปกรณ์แต่ละด้านจึงเป็นได้ทั้งตัวส่งและตัวรับ แต่ไม่สามารถรับและส่งพร้อมกันในเวลาเดียวกันได้ ทำให้ทิศทางของการส่งผ่านข้อมูลมีทิศทางเดียวในเวลาใดๆ

3.การสื่อสารสองทิศทาง (Full duplex) ใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ 2 ชนิดที่ติดต่อกัน โดยมีทิศทางของการส่งผ่านข้อมูลสามารถไหลได้ทั้งสองทางในเวลาเดียวกัน ดังนั้นอุปกรณ์ทั้งสองฝั่งสามารถรับและส่งข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน

2.4 การส่งผ่านข้อมูล(Transmission modes)

การส่งผ่านข้อมูลเป็นกระบวนการในการนำกลุ่มของบิตข้อมูลจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์หนึ่งหรือการส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ฝั่งส่งไปยังอุปกรณ์ฝั่งรับ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรมและแบบขนาน

- การส่งผ่านข้อมูลแบบขนาน (Parallel Transmission) เป็นการส่งผ่านข้อมูลแบบทีละหลายๆบิตจากอุปกรณ์ส่งไปยังอุปกรณ์รับพร้อมๆกัน และสายสัญญาณที่ใช้รับส่งจะต้องมีอย่างน้อยเท่ากับจำนวนบิตที่ส่งออกไปพร้อมกันนั้น ข้อดีของการส่งผ่านข้อมูลแบบขนาน คือ สามารถรับส่งข้อมูลได้รวดเร็ว และส่งข้อมูลได้ปริมาณมากๆในหนึ่งหน่วยเวลา ข้อเสีย ได้แก่ ต้องใช้สายในปริมาณที่มากทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายมาก,การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มัดสายหลายๆเส้นรวมกันในเคเบิลเดียวกันทำให้สายมีขนาดใหญ่ เทอะทะ,คุณสมบัติของสายแต่ละเส้นไม่เหมือนกัน ทำให้ข้อมูลมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกันเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่เครื่องรับ

- การส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Transmission) ใช้สายสัญญาณเส้นเดียวในการส่งผ่านข้อมูลทั้งหมด ทำให้ค่าใช้จ่ายถูกกว่าแบบขนาน แต่ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลช้ากว่าแบบขนาน

การส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรมนั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ การส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัส (Synchronous) และการส่งผ่านข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

- การส่งผ่านข้อมูลแบบซิงโครนัสจะไม่ใช้บิตเริ่มต้นและบิตสิ้นสุด และจะไม่มีการหยุดชั่วขณะระหว่างตัวอักษร (Character) แต่จะใช้วิธีให้จังหวะเวลาทั้งสองทางที่ติดต่อกัน มีอยู่สองวิธีที่ปฏิบัติกัน คือ ใช้ตัวอักษรซิงค์ (Sync character) และใช้สัญญาณนาฬิกา (Clock signal) การใช้ตัวอักษรซิงค์ โดยใส่ไว้หน้าบล็อกของข้อมูล ตัวอักษรซิงค์นี้เป็นบิตซึ่งทางอุปกรณ์เครื่องรับสามารถใช้ในการกำหนดอัตราเร็วของข้อมูลให้ตรงกับทางอุปกรณ์เครื่องส่ง ส่วนการใช้สัญญาณนาฬิกาของด้านส่งและสัญญาณนาฬิกาของด้านรับจะใช้คนละสายหรือคนละช่องสัญญาณในการส่งข่าวสารเกี่ยวกับเวลาของข้อมูลที่จะส่ง ดังนั้น การติดต่อกันแบบนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้น คือ สัญญาณนาฬิกา ,ข้อมูลและกราวนด์

- การส่งผ่านข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือการรับและส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นจะต้องมีสัญญาณนาฬิการ่วมด้วยเหมือนกับการรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส แต่จะให้การกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาทั้งภาครับและภาคส่งให้มีค่าเท่ากันเรียกสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดค่าให้ภาครับและภาคส่งนี้ว่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลหรือบิตเรต (Bit rate) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที

รูปแบบของข้อมูลแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

- บิตเริ่มต้น (start bit) ซึ่งจะมีขนาด 1 บิต
- บิตข้อมูลแบบอนุกรมจะมีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต
- บิตตรวจสอบพาริตี้ (Parity Bit) จะมีขนาน 1,1.5, หรือ 2 บิต

ในการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสเมื่อไม่มีข้อมูลจะมีสถานะลอจิก "1" ซึ่งจะเรียกสถานะนี้ว่าสถานะหยุดรอ (Waiting stage) เมื่อมีการเริ่มต้นส่งข้อมูลจะเริ่มจากการให้ข้อมูลมีลอจิก "0" ด้วยช่วงระยะเวลา 1 บิต ซึ่งเรียกบิตนี้ว่าบิตเริ่มต้น จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไป โดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB) ก่อน ซึ่งข้อมูลในไบต์ที่จะส่งอาจจะมีจำนวนบิต 5,6,7 หรือ 8 บิตก็ได้จากนั้นจะตามด้วยบิตพาริตี้ ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่ส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่จะส่ง คือ บิตปิดท้าย ซึ่งจะให้สถานะลอจิก "1" อีกครั้งด้วยระยะเวลาอย่างน้อย 1,1.5 หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว โดยอัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลคือ ค่าบิตเรตหรือจำนวนบิตของข้อมูลที่สามารถถ่ายทอดได้ภายใน 1 วินาที บิตเรตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้แก่ 110,150,300,600,1200,2400,4800,9600และ 19200 บิตต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

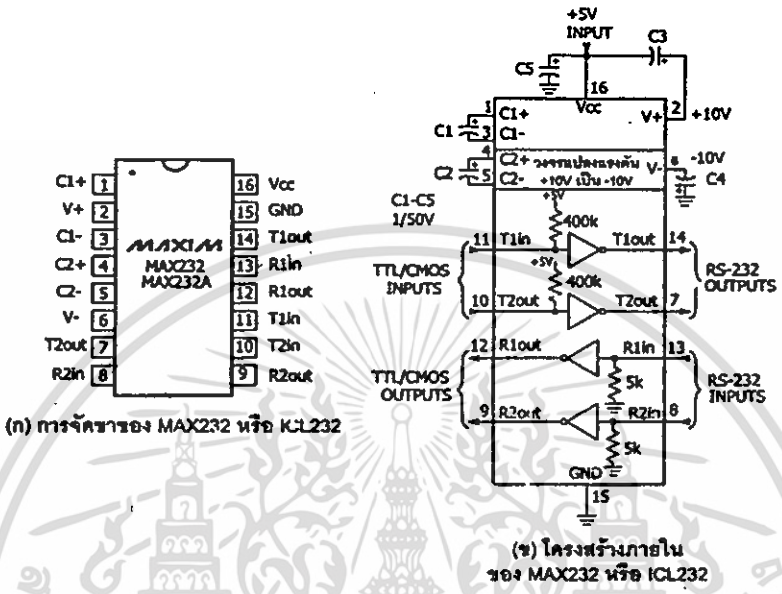
การตรวจสอบพาริตี้สามารถกำหนดให้เป็นแบบคี่ (Odd) หรือแบบคู่ (Even) หรือไม่มีการตรวจสอบพาริตี้ก็ได้ การตรวจสอบพาริตี้เป็นการตรวจสอบจำนวนรวมของบิตที่เป็นลอจิก "1" ภายในข้อมูลที่ส่งไป 1 ไบต์ว่ามีจำนวนรวมเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ โดยต้องรวมบิตพาริตี้เข้าไปด้วย ส่วนทางภาครับจะต้องทำการกำหนดคุณสมบัติการตรวจสอบพาริตี้ให้ตรงกันว่าจะตรวจสอบพาริตี้คี่หรือพาริตี้คู่ เมื่อได้รับข้อมูลก็จะทำการตรวจสอบค่าพาริตี้ที่เกิดขึ้นว่าเป็นคู่หรือคี่ โดยการนับจำนวนลอจิก "1" ทั้งหมดรวมทั้งบิตพาริตี้ด้วย ถ้ากำหนดพาริตี้ไว้เป็นคู่แต่อ่านค่าตัวเลขในการนับออกมาได้ตัวเลขเป็นคี่ ทางภาครับจะแสดงข้อมูลผิดพลาดออกมาให้ผู้ใช้ทราบ นับเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการถ่ายทอดข้อมูลที่ง่ายที่สุด แต่จะเชื่อถือได้เมื่อมีบิตข้อมูลที่ทำการส่งบิตผิดเพียงบิตเดียวหรือผิดพลาดเป็นจำนวนคี่เท่านั้น ถ้าข้อมูลที่ทำการส่งมีบิตที่ผิดพลาดมากกว่า 1 บิต

2.5 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS 232

RS-232 หรือ V.24 เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์รับส่งปลายทาง (Data Terminal Equipment หรือ DTE) กับอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล (Data Circuit Terminating Equipment หรือ DCE) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไบนารี(Binary) แบบอนุกรมโดยที่ RS-232 เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นจากสมาคมอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม (Electronic Industries Association หรือ EIA) ซึ่งเกิดมาด้วยความร่วมมือของบริษัท Bell ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตคอมพิวเตอร์และโมเด็มเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการเชื่อมต่อตัวอักษรภาษาอังกฤษของคำว่า "RS" ย่อมาจาก "Recommended Standard" แล้วตามด้วยเลข 3 ตัว และปิดท้ายด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษ A,B,C และ D เป็นการแสดงถึงรุ่นที่ได้รับการพัฒนา มาตรฐาน RS-232 ที่สร้างขึ้นโดยสมาคมอิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรมจะเทียบเท่ากับมาตรฐาน V ที่สร้างขึ้นโดยองค์การสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (Consultative committee on Internation Telephone and Telegraph หรือ CCITT) มาตรฐานนี้ในช่วงแรกจะใช้คอนเน็กเตอร์เป็นแบบ DB-25 โดยกำหนดความยาวสูงสุดของสายสัญญาณไว้ที่ 50 ฟุต มีระดับแรงดันสัญญาณตั้งแต่ -3 ถึง -12 โวลต์ แสดงว่าเป็นข้อมูล (Mark) และ +3 ถึง +15 โวลต์ แสดงว่าเป็นช่องว่าง(Space)

มาตรฐาน RS-232 ได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์รับส่งปลายทางกับอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลไว้ว่าอุปกรณ์รับส่งปลายทางจะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัวเช่นไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างบิตข้อมูลแบบอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลจะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์รับส่งปลายทางเท่านั้น โดยการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะกระทำผ่านมาตรฐาน RS-232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

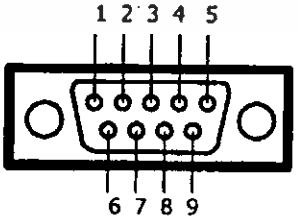


รูปที่ 2.3 รูป MAX232 และโครงสร้างภายในของ MAX232

ข้อแตกต่างของอุปกรณ์รับส่งปลายทาง และอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลอย่างหนึ่งที่เห็นได้ชัด คือ คอนเน็กเตอร์ของอุปกรณ์รับส่งปลายทางจะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลจะเป็นตัวเมีย ซึ่งพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบ DTF ส่วนคอนเน็กเตอร์ที่โมเด็มจะเป็นแบบ DCE

ในปัจจุบันขาของคอนเน็กเตอร์ได้ถูกลดจำนวนลงเนื่องจากคอนเน็กเตอร์ถูกลดจำนวนลงเนื่องจากคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 นั้นมีสายสัญญาณถึงสองชุดใน 1 ตัว เป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นจึงมีคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 ไว้สำหรับใช้งาน ซึ่งอุปกรณ์นั้นก็มีคอนเน็กเตอร์เป็นแบบ DB-9 ด้วย

ขาของคอนเน็กเตอร์ตัวผู้และตัวเมียของ DB-9 แสดงได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 คอนเน็กเตอร์ 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากหลังคอมพิวเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD : Carrier Detect ขานี้จะแอกทีปเมื่อมีการส่งสัญญาณพาห์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก(ขาที่ 1)

RD : Received Data ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยจะนำข้อมูลที่อ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์ (ขาที่ 2)

TD : Transmission Data ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดยจะนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลออกไป (ขาที่ 3)

DTR : Data Terminal Ready เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่าต้องการติดต่อด้วย โดยขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทางและขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ถ้าใช้การเชื่อมต่อเป็นแบบไม่ใช้โมเดม (Null Modem) ซึ่งให้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 เส้น จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกันและต้องต่อขา DCD ด้วยในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์ (ขาที่ 4)

SG : Signal Ground เป็นขากราวนด์ของระบบ (ขาที่ 5)

DSR : Data Set Ready ขานี้จะใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทางซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรบข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR (ขาที่ 6)

RTS : Request to Send เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS ก็คือ ขา CTS ในกรณีที่ใช้การเชื่อมต่อแบบไม่ใช้โมเด็ม 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อขา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน เพื่อจะให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา (ขาที่ 7)

CTS : Clear to Send ขานี้จะคอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับสัญญาณได้ ข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้น ขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือไม่ (ขาที่ 8)

RI : Ring Indicator ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ โดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับโมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น (ขาที่ 9)

2.6 โพล และ ซีเลคท์

ในการเชื่อมต่อแบบหลายจุด ระหว่างสถานีปฐมภูมิและสถานีทุติยภูมิมากกว่า 1 ตัวนั้น โอกาสที่จะเกิดการผิดพลาด เนื่องจากการส่งข้อมูลมาพร้อมกันนั้นมีสูง ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ในโครงงานนี้จึงใช้วิธีการ โพล และ ซีเลคท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพล (poll) คือการที่สถานีปฐมภูมิสั่งการร้องขอข้อมูลจากสถานีทุติยภูมิ

ซีเลคท์ (Select) คือการที่สถานีปฐมภูมิเลือกที่จะติดต่อกับสถานีทุติยภูมิ เมื่อมันมีข้อมูลที่จะส่งและเป็นการบอกแก่สถานีทุติยภูมิว่าข้อมูลกำลังมาถึง

รูป 2.5 เป็นการอธิบายหลักการเหล่านี้ ในรูปทางซ้าย สถานีปฐมภูมิทำการโพล สถานีทุติยภูมิโดยการส่งข่าวโพล โดยย่อให้ในกรณีนี้ สถานีทุติยภูมิไม่มีอะไรที่จะส่งก็ตอบรับด้วยข่าวสาร (nak) เวลาทั้งหมดที่แสดงลำดับในการทำงานคือ

$$T_N = t_{prop} + t_{poll} + t_{proc} + t_{nak} + t_{prop}$$

โดยที่

T_N = เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการโพลสถานีปลายทาง โดยไม่มีการส่งข้อมูล
(total time to poll terminal with nothing to Send)

t_{prop} = เวลาที่ข้อมูลใช้ในการเดินทาง
(propagation time = $t_1 - t_0$, $t_5 - t_4$)

t_{poll} = เวลาที่ใช้ส่งการโพล
(time ti transmit a poll = $t_2 - t_1$)

t_{proc} = เวลาที่จัดการกับการโพลก่อนการตอบรับ
(time to process poll before acknowledging = $t_3 - t_2$)

t_{nak} = เวลาที่ใช้ส่งการรับรู้เชิงปฏิเสธ
(time to transmit a negative acknowledging = $t_4 - t_5$)

รูปทางขวา แสดงกรณีที่โพลทำงานได้สำเร็จ เวลาที่ใช้ทั้งหมดก็คือ

$$T_p = t_{prop} + t_{poll} + t_{ack} + t_{data} + 2t_{proc}$$
$$= T_N + t_{prop} + t_{data} + t_{proc}$$

โดยเราสมมุติว่าเวลาของขบวนการที่ตอบสนองต่อข่าวสารใด ๆ คงที่

รูปแบบที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดของการโพลก็คือ roll-call polling โดยที่สถานีปฐมภูมิเลือกโพลสถานีทุติยภูมิแต่ละสถานี โดยการตรวจสอบตามลำดับ ในกรณีที่ง่ายที่สุด สถานีปฐมภูมิจะเลือกทุก ๆ สถานีทุติยภูมิในลำดับวนรอบ $S_1, S_2, \ldots, S_n$ สำหรับทุกค่าของ n ของสถานีทุติยภูมิ และทำซ้ำเป็นลำดับ โดยในโครงงานนี้ในเลือกใช้การโพลในลักษณะนี้ และรูปแบบของเวลาสามารถแสดงได้ดังนี้

$T_c = nt_N + kt_D$ โดยที่

T_c = เวลาในการโพล 1 รอบ ที่สำเร็จสมบูรณ์
(time for one complete polling cycle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_N = เวลาเฉลี่ยเพื่อที่จะโพลการส่งถ่ายข้อมูลทุติยภูมิ

(average time to poll a secondary exclusive of data transfer)

T_D = เวลาที่ส่งถ่ายข้อมูล

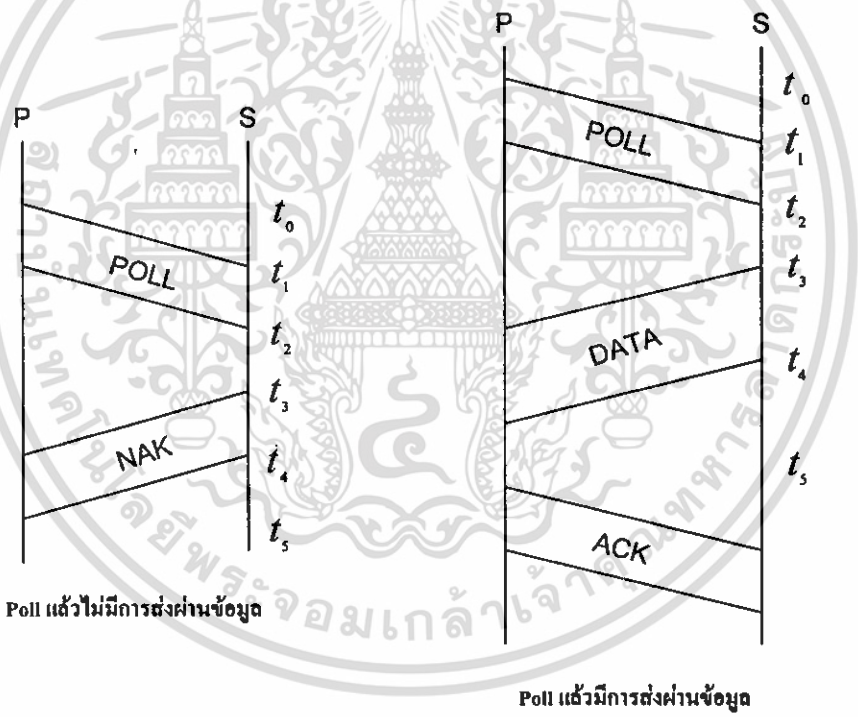
(time to transfer data = t_{prop} + t_{data} + t_{proc})

n = จำนวนของสถานีทุติยภูมิ

(number of Secondary stations)

k = จำนวนของสถานีทุติยภูมิที่ส่งข้อมูลระหว่างรอบปฏิบัติการนั้น

(number of Secondary stations with data send during the cycle)



รูปที่ 2.5 แสดงลำดับการทำงานของโพลและซีเลคท์

2.7 การมอดูเลตแบบฟรีเควนซีชิพท์คีย์อิ้ง (Frequency Shift Keying)

การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอล (Digital Modulation) เข้ากับคลื่นพาห์ที่เป็นสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) ทำเพื่อต้องการให้สัญญาณดิจิตอลเหล่านั้นสามารถส่งผ่านตัวกลางที่ออกแบบมาสำหรับสัญญาณแบบอนาลอกได้ หรือทำการแปลงจากสัญญาณอนาลอกนั่นเอง ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ 4 แบบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แอมปลิจูดชิพท์คีย์อิ้ง (Amplitude Shift Keying หรือ ASK)
2. ฟรีเควนซีชิพท์คีย์อิ้ง (Frequency Shift Keying หรือ FSK)
3. เฟสชิพท์คีย์อิ้ง (Phase Shift Keying หรือ PSK)
4. ควอดราเจอร์แอมปลิจูดมอดูเลชั่น (Quadrature Amplitude Modulation หรือ QAM)

การมอดูเลตแบบเอฟเอสเคเป็นการมอดูเลตที่รูปคลื่นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ซึ่งถูกควบคุมโดยระดับแรงดันของสัญญาณข่าวสาร โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันสัญญาณก็จะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ส่วนแอมปลิจูดและเฟสคงที่ตลอด การสร้างสัญญาณเอฟเอสเคสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

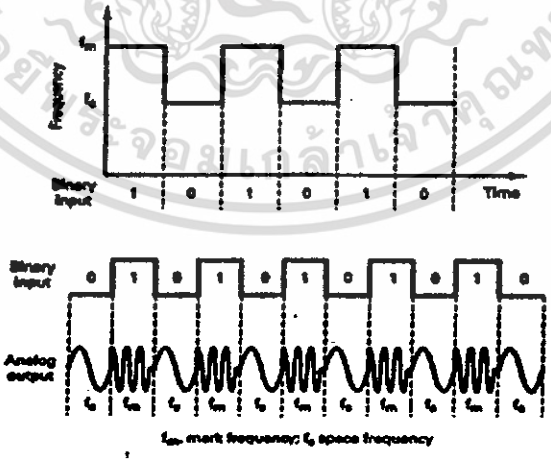
1. สร้างจากสวิตช์แบบดิจิตอล สัญญาณดิจิตอลจะเลือกออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่ที่ต้องการเพื่อส่งสัญญาณออกไปโดยจำนวนออสซิลเลเตอร์ที่ใช้จะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนระดับแรงดันของสัญญาณข่าวสาร จึงทำให้เฟสของสัญญาณแต่ละช่วงไม่มีความต่อเนื่องกัน

2. สร้างโดยการใช้ออสซิเลเตอร์ตัวเดียวกัน โดยที่ออสซิเลเตอร์นั้นสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ได้ สัญญาณที่ได้จากวิธีนี้จะมีความต่อเนื่องของสัญญาณ จึงเรียกว่า เอฟเอสเคเฟสต่อเนื่อง

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของสัญญาณเอฟเอสเคพบว่า เป็นการเปลี่ยน Digital Signal ให้เป็น Analog Data โดยเมื่อข้อมูล "0" เข้ามา จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ ω_1 และเมื่อข้อมูล "1" เข้ามา ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ ω_2 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$S_1(t) = A\cos(\omega_1 t)$ สำหรับสัญญาณไบนารี 0 (2.1)

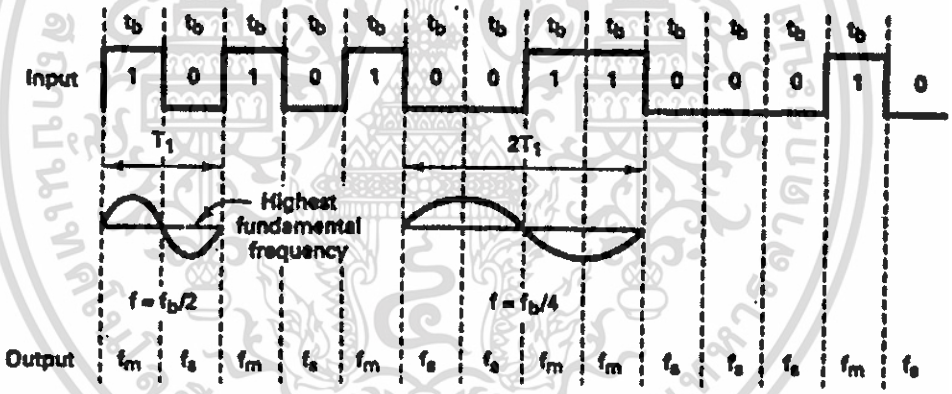
$S_2(t) = A\cos(\omega_2 t)$ สำหรับสัญญาณไบนารี 1 (2.2)



รูปที่ 2.6 ลักษณะของสัญญาณเอฟเอสเค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของเอฟเอสเค คือ เมื่อสัญญาณดิจิตอลที่มีลักษณะเป็นข้อมูลไบนารีถูกส่งเข้า จะทำให้ความถี่เลื่อนหรือเบี่ยงเบนไปตามการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลไบนารีที่เข้ามาดังนั้นสัญญาณทางเอาต์พุตของเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์จะอยู่ในรูปของความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (Frequency Continuous) เมื่อข้อมูลไบนารีด้านอินพุตเปลี่ยนแปลงจากสถานะลอจิก "1" เป็นลอจิก "0" (หรือในทางกลับกันคือลอจิก "0" เป็นลอจิก "1") สัญญาณเอาต์พุตก็จะเลื่อนความถี่ระหว่าง 2 ความถี่ด้วยกัน คือ ความถี่ที่ลอจิก "1" หรือ Mark frequency (f_m) และความถี่ที่ลอจิก "0" หรือ Space frequency (f_s) โดยการเปลี่ยนแปลงหรือการเลื่อนของความถี่แต่ละครั้งจะเกิดขึ้นเมื่อสถานะของลอจิกด้านสัญญาณเข้าเปลี่ยนแปลงนั่นคืออัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณออกจะเท่ากับสัญญาณเข้าซึ่งในดิจิตอลมอดูเลชั่นนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณด้านอินพุตของเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์จะเรียกว่า อัตราบิต (Bit Rate) มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที (bps) ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณด้านเอาต์พุตของเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์เรียกว่า อัตราบอด (Baud Rate) ดังนั้น ในการส่งข้อมูลของเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์ อัตราบิตจะเท่ากับอัตราบอดเสมอ



รูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต

จากรูปที่ 2.7 อัตราการเปลี่ยนแปลงที่เร็วที่สุดของสัญญาณอินพุตจะเกิดขึ้นเมื่อไบนารีมีลักษณะเป็น 1 และ 0 สลับกันซึ่งก็คือ สัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) นั่นเอง ซึ่งความถี่หลัก (Fundamental Frequency) ของคลื่นสี่เหลี่ยมจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการส่งข้อมูล ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะความถี่หลักเพียงอย่างเดียวแล้วความถี่สูงสุดของสัญญาณดิจิตอลที่ต้องการนำมาอดูเลตแบบเอฟเอสเคจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของอัตราการส่งข้อมูล คือ

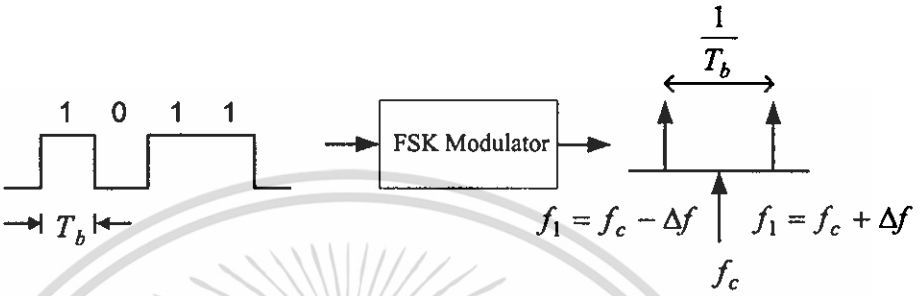
$$f_{a\max} = Bit\ Rate / 2 \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เมื่อ f_{amax} คือ ความถี่สูงสุดของสัญญาณดิจิตอลที่จะนำมามอดูเลต

ความถี่กลาง (Center Frequency หรือ f_0) ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator) จะอยู่ในตำแหน่งกลางระหว่าง f_m กับ f_s ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเบี่ยงเบนความถี่ของเอฟเอสเค

ลอจิก 1 ด้านอินพุตจะเลื่อนความถี่ของวงจรแรงดันควบคุมออสซิลเลเตอร์ จาก f_0 ไปเป็น f_s จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลไบนารีด้านอินพุตจาก "1" ไป "0" หรือ "0" ไป "1" จะทำให้ความถี่เอาต์พุตของเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์เลื่อนหรือเบี่ยงเบนกลับไปมาระหว่าง f_m หรือ f_s เนื่องจากเอฟเอสเคนั้นก็คือ รูปแบบหนึ่งของการมอดูเลตทางความถี่ ดังนั้นดัชนีการมอดูเลต (Modulate Index หรือ MI) ในเอฟเอสเคก็สามารถหาได้เช่นเดียวกับการมอดูเลตทางความถี่

$$MI = \Delta f / f_a \qquad (2.4)$$

เมื่อ MI คือ ดัชนีการมอดูเลต

Δf คือ การเบี่ยงเบนของความถี่ใด ๆ จากความถี่กลาง (Hz)

f_a คือ ความถี่ของสัญญาณที่นำมามอดูเลต (Hz)

ค่า MI ที่ยอมให้ได้สูงสุด คือ ค่า MI ที่ทำให้แบนวิดธ์กว้างที่สุดซึ่งจะเกิดขึ้นการเบี่ยงเบนของความถี่ถูกมอดูเลตแล้ว และความถี่ของสัญญาณที่นำมามอดูเลตมีค่าสูงสุดในเอฟเอสเค ค่า Δf เป็นการเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุด (Peak frequency deviation) ของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง f_m กับ f_0 หรือ f_0 กับ f_s ซึ่งก็คือ ครึ่งหนึ่งของความแตกต่างระหว่าง f_m กับ f_s นั่นคือ

$$\Delta f = (f_m - f_s)/2 \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50090

การเบี่ยงเบนของความถี่สูงสุดจะขึ้นอยู่กับขนาดหรือแอมปลิจูดของสัญญาณที่นำมามอดูเลต (สัญญาณดิจิตอล) เมื่อสถานะทางลอจิกเป็น "1" จะให้แรงดันออกมาคงที่ค่าหนึ่ง (เช่น 5 โวลต์) หรือ ถ้าในลอจิก "0" แรงดันออกมาคงที่ในระดับลอจิกเช่นกัน (เช่น 0 โวลต์)

f_a เป็นความถี่ของข้อมูลไบนารีด้านอินพุต ซึ่งจะทำให้แบนวิดธ์กว้างที่สุดเมื่อ

f_a = Bit Rate/2 เท่านั้น เพราะฉะนั้นเราสามารถหาค่า MI ได้จาก

$$MI = (f_s - f_m)/f_b \qquad (2.6)$$

เมื่อ $(f_s - f_m)$ คือ ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด

f_b คือ อัตราบิตของไบนารีอินพุต

โดยทั่วไป ความกว้างของแบนวิดธ์จะแปรผันตรงกับค่า MI ซึ่งเช่นเดียวกับฟรีเควนซีชิฟคีย์อิ้งที่ค่า MI โดยทั่ว ๆ ไปจะต้องมีค่าต่ำกว่า 1.0 เพื่อให้มีค่าแบนวิดท์ที่แคบที่สุดเรียกว่า Minimum Nyquist Bandwidth (f_b)

ส่วนทางด้านฟรีเควนซีชิพท์คีย์อิ้งดีมอดูเลชั่น จะเป็นตัวแยกสัญญาณไบนารีออกจากฟรีเควนซีชิพท์คีย์อิ้ง ซึ่งสามารถกระทำได้หลายแบบแต่ในที่นี้จะกล่าวถึง 3 แบบ คือ

1. ใช้วงจร Match Filter วงจรจะประกอบไปด้วยส่วนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass filter) ซึ่งจะทำหน้าที่กรองความถี่ f_1 และ f_2 ซึ่งเราจะแทนด้วยลอจิก 1 และลอจิก 0 ตามลำดับ ต่อมานำเอาต์พุตของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านมาเข้าวงจรตรวจจับกรอบสัญญาณ (Envelope Detector) ซึ่งจะทำการจับกรองของสัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน(Band pass Filter)และนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบ (Comparator) ซึ่งจะได้สัญญาณไบนารีออกมา

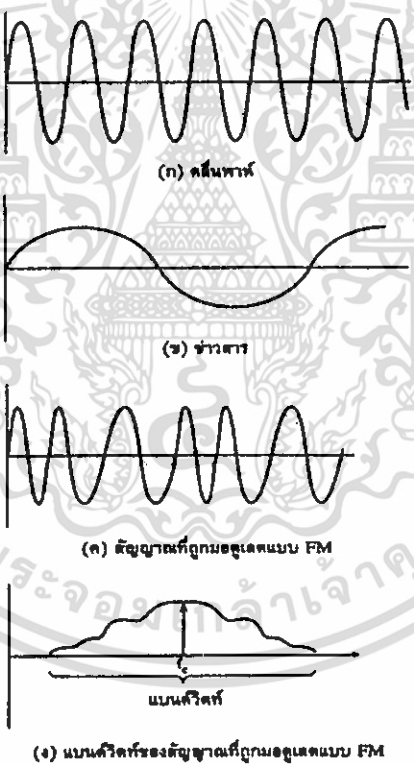
2. ใช้วงจรเฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop : PLL) จะมีความถี่ฟรีรันนิ่งเท่ากับ Center

3. Frequency (f_0) และในขณะที่ความถี่อินพุตของวงจรเฟสล็อคลูปเลื่อนไปมาระหว่าง f_m กับ f_s จะทำให้เกิดแรงดันคลาดเคลื่อนไฟตรง (DC Error Voltage) ซึ่งเป็นผลมาจากการเปรียบเทียบทางเฟส (Phase Comparator) ของสัญญาณอินพุต เนื่องจากความถี่อินพุตที่เข้ามายังวงจรเฟสล็อคลูปมีเพียง 2 ความถี่ คือ f_m กับ f_s ดังนั้นค่าแรงดันดังกล่าวจึงมีเพียง 2 ระดับเท่านั้น ซึ่งสามารถแทนค่าลอจิก "1" และลอจิก "0" เมื่อความถี่ทางอินพุตเป็น f_m กับ f_s ตามลำดับ เราจึงได้สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเฟสล็อคลูปกลับมาเป็นข้อมูลไบนารีเหมือนกับตอนแรกที่ส่งมาทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation : FM)

ในการมอดูเลตทางความถี่ แอมปลิจูดของคลื่นพาห์จะไม่มีผลหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นพาห์จะเกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแอมปลิจูดของสัญญาณความถี่ที่นำมาผสม (Modulating signal) ความถี่ของคลื่นพาห์ขณะที่ยังไม่มีการผสมเรียกว่า ความถี่กึ่งกลาง (center frequency) เมื่อแอมปลิจูดของสัญญาณมอดูเลตมีขนาดเพิ่มขึ้นทางบวกจะทำให้ความถี่ของคลื่นพาห์เพิ่มขึ้น และถ้าขนาดของสัญญาณมอดูเลตลดลง ความถี่ของคลื่นพาห์ก็จะลดลงจนกระทั่งสัญญาณมอดูเลตลดลงเป็นศูนย์ ความถี่ของคลื่นพาหะก็จะเป็นความถี่กึ่งกลาง ในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณที่ต้องการผสมเป็นลบ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ก็จะลดลง และความถี่ของคลื่นพาห์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อสัญญาณมอดูเลตมีค่าขนาดลดลงถึงจุดต่ำสุด ความถี่คลื่นพาห์จะเป็นความถี่กึ่งกลางอีกครั้งก็ต่อเมื่อสัญญาณมอดูเลตผ่านครึ่งไซเคิลลบไปถึงศูนย์



รูปที่ 2.9 สัญญาณเอฟเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าขนาดของคลื่นพาห์จะคงที่เสมอไม่ว่าสัญญาณเสียงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ส่วนที่เปลี่ยนแปลงคือ ความถี่ของคลื่นพาห์เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงของความถี่ตามความแรงของสัญญาณมอดูเลตนั้นเรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่ (Frequency deviation) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของความถี่พาหะมาก ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีค่าสูงเป็นอัตราส่วนโดยตรงต่อกันนอกจากนี้สิ่งที่ควรจะทำความเข้าใจ คือ การเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดไปครบ 1 รอบ สัญญาณเอฟเอ็มก็จะเปลี่ยนตามไปครบ 1 รอบด้วย ถ้าค่าอัตราการเบี่ยงเบนสูง ก็แสดงว่าความถี่ของสัญญาณมอดูเลตสูง ดังนั้นค่าอัตราการเบี่ยงเบนจึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณมอดูเลต สัญญาณมอดูเลต e_m จะไปเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห์ สมมติให้ความถี่พาห์เปลี่ยนไป ke_m กำหนดให้ k คือค่าคงที่ เรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่คงที่ (Frequency Deviation Constant) ดังนั้นความถี่พาห์ชั่วคราว (Instantaneous Deviation Constant) ที่เปลี่ยนแปลงไป คือ

$$f_i = f_c + ke_m \tag{2.7}$$

f_c คือ ความถี่ของคลื่นพาห์ที่ยังไม่มีการมอดูเลต ถ้าเป็นคลื่นรูปซายน์ จะได้

$$e_m = E_m \sin \omega_m t \tag{2.8}$$

แทนค่าสมการ 2.7 ในสมการ 2.8 จะได้

$$f_i = f_c + kE_m \sin \omega_m t \tag{2.9}$$

ความถี่สูงสุดที่เปลี่ยนไปตามสัญญาณเสียงคือ

$$\Delta f = kE_m \tag{2.10}$$

ดังนั้นสมการ 2.9 จะกลายเป็น

$$f_i = f_c + \Delta f \sin \omega_m t \tag{2.11}$$

ให้คลื่นพาหะที่ยังไม่ได้มอดูเลต คือ คลื่นรูปซายน์

$$e_m = E_m \sin(\omega_c t + \phi) \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เชิงมุมคงที่ (Constant Angular Velocity) = $\omega = 2\pi f_c$ มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที และ ϕ คือ มุมเฟสคงที่ (Constant Phase Angle) มีหน่วยเป็นเรเดียน

สมการทั่วไปของ 2.12 คือ

$$e_c = \sin\theta(t) \tag{2.13}$$

เมื่อความถี่เปลี่ยนไป เช่น ในกรณีของการมอดูเลตทางความถี่ ความถี่เชิงมุมชั่วขณะ (Instantaneous Angular Frequency)

$$\omega_i = 2\pi f_i = d\theta(t) \tag{2.14}$$

อินทิเกรตสมการ 2.14 ตามเวลาจะได้

$$\theta(t) = \int \omega_i dt \tag{2.15}$$

ค่าของ f_i ชั่วขณะนี้จะมีความสัมพันธ์กับการมอดูเลตตามสมการ 2.11 ความถี่เชิงมุมคงที่ (ในกรณีที่ยังไม่มีการมอดูเลต)

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \int \omega_c dt \\ &= \omega_c t + \phi\end{aligned} \tag{2.16}$$

ϕ คือ ค่าคงที่ของการอินทิเกรต จะเห็นได้ว่าสมการที่ 2.12 ได้มาจากการแทนค่าของสมการ 2.16 ในสมการ 2.13 สำหรับการมอดูเลตคลื่นซายน์ แทนค่าสมการ 2.5 ในสมการ 2.9 จะได้

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \int 2\pi(f_c + \Delta f \sin\omega_m t)dt \\ &= \omega_c t - \{\Delta f / f_m\}\cos\omega_m t + \phi\end{aligned} \tag{2.17}$$

และ $\omega_m = 2\pi f_m$ คลื่นมอดูเลตซายน์สามารถหาได้จากการแทนค่าสมการ 2.17 ในสมการ 2.13 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$e = \sin(\omega_c t - \{\Delta f / f_m\}\cos\omega_m t) \qquad (2.18)$$

ดัชนีการมอดูเลต่ (Modulation Index) สำหรับการมอดูเลตทางความถี่ คือ

$$m_f = \Delta f / f_m \qquad (2.19)$$

จากสมการ 2.18 จะได้

$$e = \sin(\omega_c t - m_f \cos\omega_m t) \qquad (2.20)$$

สเปกตรัมประกอบด้วยคลื่นพาหะและฮาร์โมนิกข้างเคียงของความถี่มอดูเลตความสูงของสเปกตรัมต่าง ๆ สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันของเบสเสล (Bessel's Function)

จาก m_f คือดัชนีการมอดูเลตตามสมการ 2.19 และ n คือจำนวนความถี่ข้างเคียง และ $J_0(m_f)$ คือความสูงของคลื่นพาหะ ดูตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีการมอดูเลต	พาหะ	ไซด์แบนด์คู่ที่							
		1	2	3	4	5	6	7	8
0.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	0.98	0.12	-	-	-	-	-	-	-
0.5	0.94	0.14	0.03	-	-	-	-	-	-
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	-	-	-	-	-
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	-	-	-	-
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	-	-	-	-
2.5	-0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	-	-	-
3.0	-0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	-	-
4.0	-0.40	-0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	-
5.0	-0.18	-0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02
6.0	0.15	0.28	-0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06
7.0	0.30	0.00	-0.20	-0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13
8.0	0.17	0.23	-0.11	-0.29	-0.10	0.19	0.34	0.32	0.22
9.0	-0.09	0.24	0.14	-0.18	-0.27	-0.06	0.20	0.33	0.30
10.0	-0.25	0.04	0.25	0.06	-0.22	-0.23	-0.01	0.22	0.31

ตารางที่ 2.1 การกระจายคลื่นพาหะและไซด์แบนด์ที่ดัชนีการมอดูเลตต่าง ๆ

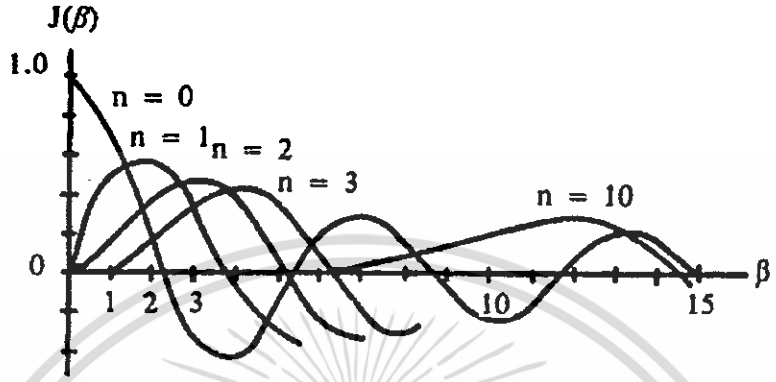
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า ถ้า $m_f = 0.5$ สเปกตรัมต่าง ๆ จะประกอบด้วย

คลื่นพาห์ (f_c) $J_0(0.5) = 0.94$

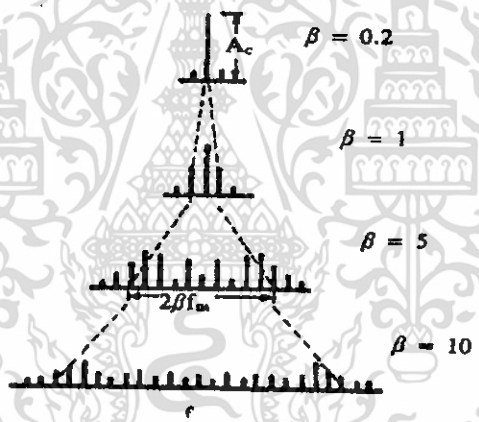
ความถี่ข้างเคียงตัวที่ 1 $(f_c \pm f_m)$ $J_0(0.5) = 0.24$

ความถี่ข้างเคียงตัวที่ 2 $(f_c \pm 2f_m)$ $J_0(0.5) = 0.03$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แอมปลิจูดของคลื่นพาห์และไซด์แบนด์ของการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของคลื่นมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม เมื่อ m_f = 0.5, 1, 2.5 และ 4.0

m_f สเปกตรัมตามค่าต่าง ๆ ของ m_f ดังรูปที่ 2.11 ในกรณีนี้ ช่องไฟของแต่ละสเปกตรัมจะห่างเท่ากับความถี่ของสัญญาณมอดูเลต (f_m) และช่วงกว้างคลื่น (Bandwidth) จะมีค่าเท่ากับ

$$B_{FM} = 2nf_m \qquad (2.21)$$

n คือ จำนวนความถี่ข้างเคียงที่ต้องการ

$$B_{FM} = 2(m_f + 1)f_m \qquad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า m_f จากสมการ 2.19 จะได้

$$B_{FM} = 2(\Delta f + f_m) \qquad (2.23)$$

ในการหาเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตจะให้ความสนใจทางด้านความถี่โดยการตั้งสมมติฐานว่า ถ้าความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจนถึงค่าสูงสุดของการเบี่ยงเบนก็เรียกว่า ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสมมติว่าค่าเบี่ยงเบนทางความถี่สูงสุดเป็น 75 กิโลเฮิรตซ์ และเมื่อป้อนสัญญาณมอดูเลตแล้วไม่มีการเบี่ยงเบนทางความถี่เพียง 37.5 กิโลเฮิรตซ์ ก็หาค่าเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตได้ = (37.5 / 75) * 100 = 50%

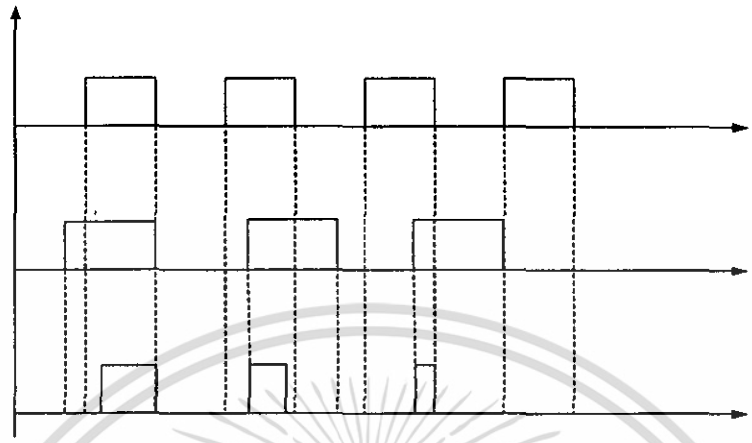
2.9 ระบบเฟสล็อกลูป

แต่ละส่วนจะมีผลต่อคุณสมบัติ และการทำงานของระบบ ซึ่งหน้าที่ของแต่ละส่วนจะอธิบายดังนี้

1. เฟสดีเทคเตอร์ ทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสของอินพุตซึ่งจะมีผลของเฟสที่ต่างกันเรียกว่า ความผิดพลาดเฟส (Phase Error) ความผิดพลาดเฟสนี้จะมีค่าน้อยที่สุดเป็นศูนย์ และจะมีค่ามากที่สุดเป็น $\pi/2$ เฟสดีเทคเตอร์จะทำให้การเปลี่ยนความผิดพลาดเฟสนี้ให้กลายเป็นระดับแรงดันด้วยค่าคอนเวอร์ชันเกน ลักษณะการเปรียบเทียบเฟสของอินพุตทั้งสองเฟสของเฟสดีเทคเตอร์จะแสดงดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุตไม่เท่ากัน

เฟสดีเทคเตอร์ จะมีใช้กัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 และแบบที่ 2

1.1 เฟสดีเทคเตอร์แบบที่ 1 จะถูกออกแบบมาเพื่อทำการตรวจจับคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave)ต่างๆ ทั้งทางอนาล็อกหรือทางดิจิตอล ซึ่งเฟสดีเทคเตอร์แบบที่ 1 จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น สำหรับเฟสอินพุต ในช่วงตั้งแต่ $0-\pi$

1.2 เฟสดีเทคเตอร์แบบที่ 2 จะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสถานะหรือขอบสัญญาณ โดยวงจรเฟสดีเทคเตอร์ชนิดนี้จะผลิตพัลส์บวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับการนำหน้า (lead) หรือตามหลัง (lag) ของสัญญาณวงจรวีซีโอ เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง ความกว้างระหว่างขอบสัญญาณอินพุตทั้งสองของเฟสดีเทคเตอร์และจะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงดันที่ป้อนให้วีซีโอ ข้อดีของเฟสดีเทคเตอร์ชนิดนี้ คือ การมีเอาต์พุตที่ไม่ขึ้นกับดิวตีไซเคิล (duty cycle) ของสัญญาณอินพุตและไม่มีการกระเพื่อม (Ripple) ที่เอาต์พุตเหมือนในกรณีของเฟสดีเทคเตอร์แบบที่ 1

2 ลูปฟิลเตอร์ ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ เนื่องจากเฟสดีเทคเตอร์ให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับร่วมมาด้วย สัญญาณความถี่ที่ได้เกิดจากความต่างเฟส ยิ่งต่างเฟสมากความถี่ยิ่งสูง ดังนั้นลูปฟิลเตอร์จึงช่วยกรองเอาสัญญาณความถี่สูง ซึ่งแสดงว่ามีความต่างเฟสมากออก ทำให้ระบบสามารถจับ (capture) สัญญาณได้ในช่วงหนึ่ง และช่วยให้ระบบรักษาการล็อกไว้ได้อีกด้วย

3 วงจรขยายสัญญาณ ใช้ปรับขนาดสัญญาณไฟตรง เพื่อให้การควบคุมดีขึ้น เอาต์พุตของวงจรนี้จะป้อนให้แก่วงจรวีซีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ ด้วยแรงดันหรือวงจรวีซีโอ ทำหน้าที่ผลิตความถี่สัญญาณโดยการควบคุมระดับแรงดันเอาต์พุตด้วยคอนเวอร์ชั่นเกนระดับของแรงดันนี้จะได้จากเอาต์พุตของลูปฟิลเตอร์ ความถี่ที่ล็อกมาจากลูปฟิลเตอร์จะมีผลทำให้เอาต์พุตของวงจรวีซีโอเปลี่ยนความถี่ด้วยเช่นกัน เนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรผลิตความถี่สัญญาณจึงเป็นส่วนที่จำเป็นสำหรับวงจรเฟสล็อกลูปวงจรวีซีโอไม่จำเป็นต้องมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่มาควบคุมมากนัก ในกรณีทั่วๆ ไป แต่ถ้าไม่เป็นเชิงเส้นมากเกินไปแล้วอัตราขยายก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณด้วย ฉะนั้น จึงต้องคำนึงถึงความเสถียรภาพของลูปด้วย

การทำงานของระบบเฟสล็อกลูปสามารถอธิบายอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้ เฟสดีเทคเตอร์จะเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณอินพุต $V_i(t)$ กับความถี่ของวงจรวีซีโอ และทำให้ได้ความผิดพลาดของแรงดันและกรองผ่านลูปฟิลเตอร์ไปควบคุมอินพุตของวงจรวีซีโอ ตามปกติเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับระบบเฟสล็อกลูป ความผิดพลาดของแรงดันจะผ่าน ลูปฟิลเตอร์ $V_d(t)$
ในฟีดแบ็กลูปจะมีค่าเป็นศูนย์ วงจรวีซีโอจะทำงานที่ความถี่ศูนย์กลาง เรียกว่า ความถี่ฟรีรันนิ่งของวีซีโอ

ถ้ามีสัญญาณอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสสลับป้อนให้กับระบบเฟสล็อกลูปและสัญญาณดังกล่าวมีความถี่อินพุตใกล้เคียงกับความถี่ฟรีรันนิ่งพอเพียงการฟีดแบ็กของเฟสล็อกลูปจะทำให้ได้ความผิดพลาดของแรงดันไปขับวงจรวีซีโอให้มีความถี่ซิงโครไนส์กับความถี่อินพุต
การทำงานของระบบเฟสล็อกลูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะตามคุณสมบัติของลูปดังนี้

1. เมื่อระบบไม่อยู่ในภาวะล็อก $(\omega_i \neq \omega_0)$

เราสมมติสัญญาณ V_i และ V_i เป็นสัญญาณรูปคลื่นซายน์มีค่าเป็น

$$V_i(t) = E_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \quad (2.27)$$

$$V_o(t) = E_o \cos(\omega_i t + \theta_o) \quad (2.28)$$

ถ้าเฟสดีเทคเตอร์มีคุณสมบัติเป็นอนาล็อกมัลติพลายเออร์เราจะได้สัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์เป็น

$$V_e(t) = K_d \cos[(\omega_i - \omega_0)t + \theta_i - \phi_0] + K_d \cos[(\omega_i - \omega_0)t + \theta_i + \phi_o] \quad (2.29)$$

เมื่อนำสัญญาณผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้เป็น

$$V_d(t) = K_d \cos[(\omega_i - \omega_0)t + \theta_i - \phi_0] \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก V_i และ V_0 ไม่ซิงโครนัสกัน ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์ V_d จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไวน์ที่มีแอมปลิจูดสูงสุดเท่ากับ K_d และมีความถี่เชิงมุมเท่ากับความถี่เชิงมุมระหว่างสัญญาณ V_i และ V_d คือ ω_i และ ω_0 มีค่าแต่กต่างกันมาก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า V_d จะไม่สามารถผ่านลูปฟิลเตอร์ได้ ทำให้ได้ค่า V_c และค่าฟีดแบ็กของลูปจะไม่มีผลอะไรคือ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ภายในลูป แรงดันเอาต์พุตของวงจรวีซีโอจะมีค่าอยู่ที่ ความถี่ฟรีรันนิ่ง ดังนั้น ω_0 และ ϕ_0 จะมีค่าเป็นอิสระอย่างสมบูรณ์ต่อ ω_i และ ϕ_0 จะพูดได้ว่าลูปไม่อยู่ในสภาวะล็อก แต่ถ้า $(\omega_i - \omega_0) \pm \omega$ มีค่าน้อยกว่าแบนด์วิดท์ของลูป ซึ่งกำหนดได้โดยพารามิเตอร์ของลูปและการฟีดแบ็กจะมีผลทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะล็อกได้

2. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะล็อก $(\omega_i = \omega_0)$

ในกรณีที่สัญญาณเอาต์พุตวงจรวีซีโอ มีความถี่ซิงโครนัสกับสัญญาณอินพุต V_i กับสัญญาณเอาต์พุต V_0 จะมีค่าเป็น

$$V_0 = E_0 \cos(\omega_i t + \psi_0) \tag{2.31}$$

นอกจากนั้นค่าของเฟสกับสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับเวลา ซึ่งมีค่าเป็น

$$\phi_0 = (\omega_i - \omega_0)t + \psi_0 \tag{2.32}$$

และสัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์หรือความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุตจะกลายเป็นสัญญาณไฟกระแสตรง มีค่าเท่ากับ

$$V_d = K_d \cos(\theta_i - \psi_0) \tag{2.33}$$

ลูปฟิลเตอร์จะยอมให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง V_i ผ่านได้และมีค่าเท่ากับ

$$V_d = K_d \cos(\theta_i - \psi_0) \tag{2.34}$$

วงจรวีซีโอจะเป็นออสซิลเลเตอร์ชนิดมอดูเลตความถี่ ความถี่เชิงมุมที่เปลี่ยนทันทีทันใดของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (ω_{inst}) จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับสัญญาณควบคุมอินพุต V_c โดยความถี่เชิงมุมที่ศูนย์กลางเป็นดังนี้

$$\omega_{inst} = \frac{d(\omega_0 t + \phi_0)}{dt} = \omega_0 + K_0 V_d$$
$$\frac{d(\phi_0)}{dt} = K_0 V_d \tag{2.35}$$

เมื่อ K_0 เป็นความไวในการมอดูเลตของวงจรวีซีโอทำการแทนค่าสมการ 2.34 ลงใน 2.35 จะได้

$$\omega_i - \omega_o = K_d K_0 \cos(\theta_i - \psi_0) \tag{2.36}$$

$$\psi_0 = \theta_i - \cos^{-1}[(\omega_i - \omega_0)/K_d K_0] \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์ V_d สามารถเขียนได้เป็น

$$V_d = (\omega_i - \omega_0)/K_0 \qquad (2.38)$$

ส่วนประกอบไฟฟ้ากระแสสลับของเฟสดีเทคเตอร์เอาต์พุต V_d จะผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปเป็นแรงดันควบคุมให้กับอินพุตของวงจรวีซีโอ

จากสมการ 2.36 จะเห็นชัดว่า สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง V_d จะไปทำให้ความถี่เชิงมุมของวงจรวีซีโอมีค่าเปลี่ยนไปจากศูนย์กลางของวงจรวีซีโอ คือ ω_0 ไปเท่ากับความถี่เชิงมุมของสัญญาณอินพุต ω_i นั่นคือ

$$\omega_{mrt} = \omega_0 + K_0 V_d = \omega_0 + (\omega_i - \omega_0) = \omega_1 \qquad (2.39)$$

ถ้าความแตกต่างของความถี่เชิงมุมเริ่มต้น $\omega_i - \omega_0$ มีค่าน้อยกว่าผลคูณของ $K_d K_0$ อย่างมาก สมการ 2.32 จะมีค่าเป็น

$$\theta_i - \psi_0 \cong \cos^{-1} 0 = \pi/2 \qquad (2.40)$$

จากสมการ 2.40 หมายความว่า ถ้าความถี่ออฟเซตระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรวีซีโอ จะมีค่าน้อยเมื่อลูปไม่อยู่ในสภาวะล็อกและสัญญาณวงจรวีซีโอจะมีเฟสต่างกับสัญญาณอินพุต 90^0 เมื่อลูปอยู่ในสภาวะล็อกหรือเฟสคอมพาราเตอร์จะสอดคล้องกับ $(\omega_i - \omega_0)$ ด้วยเหตุผลนี้จึงแทนค่า ψ_0 ด้วยค่าเฟสเอาต์พุต θ_0 ดังนั้น

$$\theta_0 = \psi_0 - \pi/2 \qquad (2.41)$$

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์เขียนเป็น

$$\begin{aligned} V_d &= K_d \cos(\theta_i - \psi_0) \\ &= K_d \cos[(\theta_i - \theta_0) - \pi/2] \\ &= K_d \sin(\theta_i - \theta_0) \end{aligned} \qquad (2.42)$$

และจากสมการ 2.38 และ 2.40 จะได้ค่าความผิดพลาดเฟสเป็น

$$\theta_i - \theta_0 = \sin^{-1}(\omega_i - \omega_0)/K_d K_0 \qquad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผลต่างของเฟส $\theta_i - \theta_0$ มีค่าน้อยเพียงพอจะได้ว่า

$$V_d = K_d(\theta_i - \theta_0) \cong K_d\theta_c \qquad (2.44)$$

เมื่อ $\theta_c = \theta_I - \theta_0$ เนื่องจากคุณสมบัติของเฟสดีเทคเตอร์แบบนี้ เมื่อลูปเข้าสู่การล็อกสัญญาณของวงจรวีซีโอ จะมีเฟสต่างไปจากสัญญาณอินพุต 90^0 คือ $(\theta_i - \theta + \pi/2)$ ดังนั้นเฟสดีเทคเตอร์จะให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่เป็นสัดส่วนกับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุต V_i กับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรวีซีโอ คือ V_0 ในลักษณะของควอดราเจอร์ คือ

$$\begin{aligned} V_d &= K_d(\theta_i - \theta_0) - \pi/2 \\ &= K_d(\theta - \pi/2) \end{aligned} \qquad (2.45)$$

สัญญาณเฟส V_d นี้ จะผ่านลูปฟิลเตอร์ ไปป้อนให้กับอินพุตที่ควบคุมวงจรวีซีโอ เพื่อแก้ไขให้ความถี่ของวงจรเปลี่ยนจาก ω_0 ไปเป็น ω_i และดำรงการล็อกให้คงอยู่ได้

$$\begin{aligned} V_d &= (\omega_i - \omega_0 / K_0) \\ \omega_i &= \omega_0 + K_0 V_d \end{aligned} \qquad (2.46)$$

จากสมการ 2.45 และ 2.46 จะหาค่าความผิดพลาดเฟส θ_c ได้เป็น

$$\theta_i = \pi/2 + (\omega_i - \omega_0)/K_d K_0 \qquad (2.47)$$

จากสมการ 2.39 จะสังเกตได้ว่า เมื่อ $\omega_i = \omega_0$ แรงดันไฟฟ้าของวงจรวีซีโอจะมีเฟสควอดราเจอร์ คือมีเฟสต่างไปจาก 90^0 เมื่อ ω_i เคลื่อนไปทางสูงกว่า ω_o มุมของเฟสจะเพิ่มขึ้นจาก 90^0 ไปสู่ค่าสูง

ถ้าความถี่ของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ระบบเฟสล็อกลูปจะสามารถติดตามสุด 180^0 ที่อยู่เหนือสุดของพิกัดการล็อกและถ้า ω_i เคลื่อนไปทางต่ำกว่า ω_o มุมเฟสจะลดลงจาก 90^0 ไปสู่ค่า 0^0 ที่ล่างสุดของพิกัดการล็อกการเปลี่ยนแปลงและอยู่ในสภาวะล็อกได้โดยจะเพิ่มค่า θ_c ให้มากขึ้นตามเวลา θ_c ที่เพิ่มขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า V_d ไปทำให้ความถี่ของวงจรวีซีโอเลื่อนไปเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุต โดย V_d จะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างระหว่างความถี่สัญญาณอินพุต ω_i กับความถี่ฟรีรันนิ่ง ω_0 ของวงจรวีซีโอ แต่ถ้าจะสามารถแทรกกิ้งได้นั้น จะต้องมีความผิดพลาดเฟสน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าระบบเฟสล็อกลูปมีเฟสอินพุตเปลี่ยนแปลงเป็นสเตปเท่ากับ $\Delta\omega = \omega_i - \omega_0$ ลูปต้องการควบคุมแรงดันเพื่อทำให้วงจรวีซีโอมีความถี่เลื่อนไปเท่ากับ $\Delta\omega$ ดังนั้น V_c จะมีค่าเป็น

$$V_c = \Delta\omega / K_0 \tag{2.48}$$

เมื่อลูปเข้าสู่สภาวะคงที่ $V_c = V_d F(s)$ เมื่อ $F(s)$ คือ อัตราขยายต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงของลูปฟิลเตอร์สัญญาณ V_c จะทำให้ลูปเข้าสู่สภาวะล็อกดังเดิม ดังนั้นความผิดพลาดเฟสจะต้องเป็น

$$\begin{aligned} \theta = \pi/2 &= V_d K_d \\ &= \Delta\omega / K_0 K_d F(s) \end{aligned} \tag{2.49}$$

เมื่อความผิดพลาดเฟสมีค่าเพิ่มขึ้นลูปจะสามารถปรับตัวเองให้มีความถี่เอาต์พุตแทรกตามการเปลี่ยนแปลงของอินพุตได้ดังเดิม เมื่อระบบอยู่ในสภาวะล็อก เราสามารถจะวิเคราะห์ระบบเฟสล็อกลูปได้ในลักษณะระบบป้อนกลับที่เป็นเชิงเส้น โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ระบบป้อนกลับแบบทั่วไปด้วยลาปลาซ ทรานส์ฟอร์มและสมการดิฟเฟอเรนเชียล จะสังเกตเห็นว่า หากแบนวิดท์ของลูปฟิลเตอร์ ω ลดลงหรือค่า K เพิ่มขึ้น ค่า ξ ของลูปลดลง ผลตอบสนองทางความถี่ของลูปจะเป็นพีคและผลตอบสนองต่อสเตปของลูปในช่วงเริ่มต้นชั่วขณะจะเกิดการออสซิลเลตค่าพีคในผลตอบสนองทางความถี่จะเป็นสาเหตุให้เกิดการผิดเพี้ยนในสัญญาณเอาต์พุตและเป็นสาเหตุให้เกิดการแกว่งหรือให้ผลตอบสนองที่เลว เมื่อลูปมีการรบกวนเกิดขึ้นชั่วขณะ การออกแบบระบบเฟสล็อกลูปให้มีคุณสมบัติการทำงานให้ดีที่สุด จึงควรกำหนดให้ ξ มีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ จะได้

$$\omega = 2K_v \tag{2.50}$$

และแนวความถี่ที่คัทออฟ 3dB แบนวิดท์ของลูปจะได้เป็น

$$\omega_n = \sqrt{K_v}\,\omega_i = \sqrt{2K_v} \tag{2.51}$$

วงจรเฟสล็อกลูปที่ใช้ในระบบสื่อสารทั่วไปจะต้องให้มีพิสัยการล็อกกว้างเพื่อจะได้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ช่วงกว้าง นอกนั้นก็ต้องการให้ระบบมีแบนด์วิดท์ของลูปแคบๆ เพื่อกำจัดสัญญาณที่อยู่นอกแบนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดความถี่ตลอดช่วงที่เฟสล็อกลูปสามารถคำรงการล็อกไว้ได้กับสัญญาณอินพุตเราเรียกว่า "พิสัยการล็อก" เราสามารถหาพิสัยการล็อกได้ โดยพิจารณาจากสมการของความผิดพลาดเฟส ซึ่งเราพบว่าความผิดพลาดเฟสจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ π น้อยที่สุดเท่ากับศูนย์ จะได้พิสัยการล็อก $\Delta\omega = \omega_i - \omega_0$ เท่ากับ

$$\Delta\omega = (\theta_e - \pi/2)K_0K_dF(s) \tag{2.52}$$

แทนค่า $\theta_{e\max} = \pi$ และ $\theta_{e\max} = 0$

$$\Delta\omega = (\pm\pi/2)K_oK_dF(s) \tag{2.53}$$
$$2\Delta\omega_L = \pm\pi K_oK_dF(s)$$

เมื่อ $\Delta\omega_i$ คือ พิสัยการล็อก

เราจะสังเกตได้ว่า ถ้า ω_i มีย่งเบนไปจากความถี่ศูนย์กลาง ω_0 มาก โดยมีค่าไม่สอดคล้องกับสมการที่ 2.47 สภาวะสมดุลของการซิงโครนัสจะไม่สามารถดำรงอยู่ต่อไปได้ และลูปจะหลุดออกไปจากการล็อกกับความถี่ของสัญญาณอินพุต

การวิเคราะห์ถึงพิสัยการล็อกระบบ ต้องมีสภาวะเดิมล็อกอยู่กับความถี่อินพุตแล้ว แต่มีอีกอย่างที่เราควรพิจารณาเมื่ออยู่ในสภาวะที่ระบบยังไม่ล็อกกับสัญญาณอินพุต เพื่อกำหนดช่วงความถี่ซึ่งระบบเฟสล็อกลูปสามารถล็อกกับสัญญาณอินพุตในช่วงความถี่ดังกล่าว ความถี่ช่วงนี้เราเรียกว่าพิสัยแคปเจอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่คัทออฟของลูปฟิลเตอร์ ω_i และพิสัยล็อก $\Delta\omega_L$ จะได้พิสัยแคปเจอร์เท่ากับ

ในกรณีทั่วๆ ไป $\Delta\omega_L >> \omega_i$

$$\Delta\omega_c = \pm\sqrt{\omega_i\Delta\omega_L} \tag{2.54}$$
$$2\Delta\omega_c = 2\sqrt{\omega_i\Delta\omega_L} \tag{2.55}$$

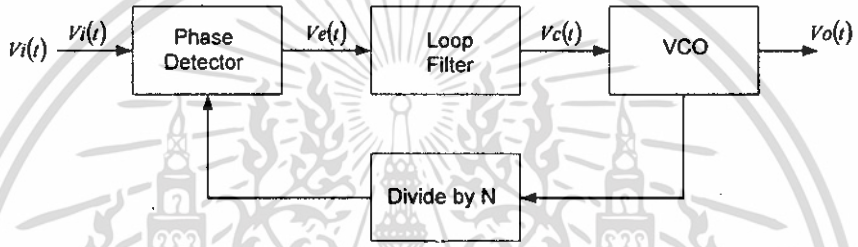
2.10 ระบบสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกลูป

วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป (Phase locked loop synthesizer) เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่ชนิดโปรแกรมได้ ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่ขนาดพอเหมาะ และให้มีความถี่ตามที่เรากำหนดโดยการประยุกต์ใช้งานของเฟสล็อกลูปซึ่งเป็นระบบป้อนกลับที่มีการเปลี่ยนความถี่และเฟสของวงจรของออสซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเตอร์ตามสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา บล็อกไดอะแกรมเบื้องต้นของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป แสดงดังรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนเปรียบเทียบเฟส (Phase Detector : PD)
2. ลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter : LF)
3. วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator)
4. วงจรหารความถี่ที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Divider)



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกลูป

การทำงานคร่าว ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าไปในระบบ แรงดันควบคุม (Control Voltage) $V_c(t)$ จะเท่ากับศูนย์ VCO จะทำงานโดยตั้งความถี่ไว้ที่ f_0 กับความถี่ของ VCO ถ้าเกิดความแตกต่างของสัญญาณทั้งสอง f_0 กับเนื่องจากความถี่ไม่ตรงกันจะเกิดแรงดันคลาดเคลื่อนออกมา $V_e(t)$ แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองผ่านลูปฟิลเตอร์ ขยายแล้วป้อนให้กับ VCO ในการนี้แรงดันควบคุม $V_c(t)$ จะไปบังคับความถี่ของ VCO ให้เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะลดความถี่ที่แตกต่างระหว่างความถี่ f_0 กับความถี่ f_R ถ้าความถี่ f_R ใกล้เคียงกับความถี่ f_0 จากการป้อนกลับของเฟสล็อกลูป ซึ่งสัญญาณที่ป้อนกลับไปยังลูปฟิลเตอร์จะเป็นความถี่เอาต์พุตของ VCO ที่ถูกหารโดย N จะทำให้ VCO ซิงโครไนส์หรือล็อก (lock) กับสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา ขณะที่ทำการล็อกนั้นความถี่ของ VCO จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตพอดี

ในสภาวะล็อกความถี่จะได้ว่า

$$f_R = f_d \tag{2.56}$$

และความถี่ที่ได้จากการหาร

$$f_d = f_0 / N \tag{2.57}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

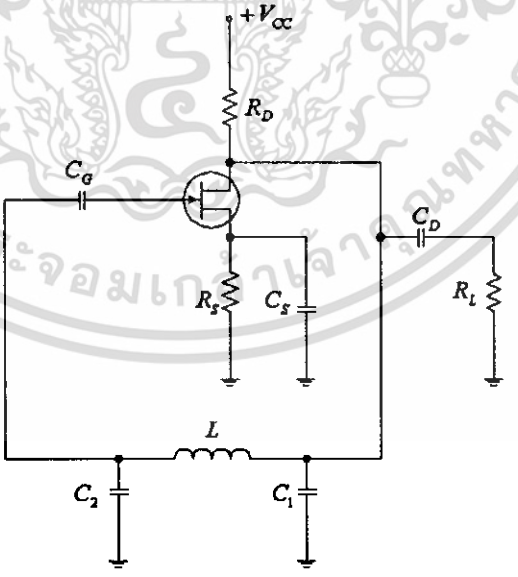
ดังนั้นความถี่ที่เอาต์พุตจะได้เป็น

$$f_0 = Nf_d \qquad (2.58)$$

แต่ในสภาวะล็อกความถี่ เฟสของสัญญาณทั้งสองจะยังคงต่างกันอยู่ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน $V_e(t)$ ที่จะไปคอยปรับความถี่ VCO จากค่าความถี่ฟรีรันนิ่ง (free-running) ให้เท่าตัวได้เอง ทำให้เฟสล็อกลูปสามารถติดตามการล็อกกับระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อน (capture range) จะขึ้นกับขอบแบนด์ของวงจรกรองความถี่และอัตราขยายลูปปิดของระบบทั้งหมด เฟสล็อกลูปที่มีการหารความถี่ชนิดโปรแกรมได้ภายในลูปเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการสังเคราะห์ความถี่ที่มีค่ามาจากความถี่อ้างอิงความถี่เดียว

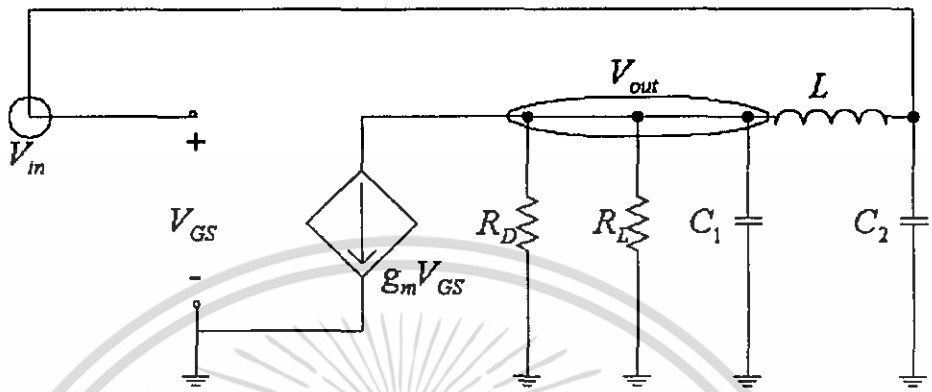
คุณสมบัติที่ต้องการของวงจรสังเคราะห์ความถี่ จะต้องผลิตสัญญาณความถี่ขนาดพอเหมาะและให้มีความถี่ตามที่เรากำหนด ช่วงความถี่ใช้งานของวงจรสังเคราะห์ความถี่จะจำกัดอยู่ในช่วงที่แน่นอน แล้วแต่การใช้งานและความละเอียดของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ทีละขั้น ซึ่งเรียกว่า รีโซลูชั่น (resolution)

2.10.1 วิเคราะห์วงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 2.15 วงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูล AC π - Model ของวงจรคอลพิทท์ออสซิลเลเตอร์

ที่ node V_{in} ;

$$V_{in}SC_2 + \frac{V_{in} - V_{out}}{SL} = 0$$

$$V_{in}\left(S^2C_2L + 1\right) - V_{out} = 0$$

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{S^2LC_2 + 1} \qquad (2.59)$$

ที่ node V_{out} ;

ให้ $R_{out} = R_D // R_L$

$$g_m V_{GS} + \frac{V_{out}}{R_{out}} + V_{out}SC_1 + \frac{V_{out} - V_{in}}{SL} = 0$$

$$g_m V_{GS} R_{out} SL + V_{out} SL + V_{out} S^2 C_1 L R_{out} + V_{out} R_{out} - V_{in} R_{out} = 0$$

แทนค่า $V_{in} = V_{GS}$;

$$g_m V_{in} R_{out} SL + V_{out} SL + V_{out} S^2 C_1 L R_{out} + V_{out} R_{out} - V_{in} R_{out} = 0$$

$$V_{out}\left(S^2C_1LR_{out} + SL + R_{out}\right) + V_{in}\left(g_m R_{out} SL - R_{out}\right) = 0 \qquad (2.60)$$

แทนค่า V_{in} ที่ได้จากสมการ (2.59) ลงในสมการ (2.60)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{out}\left(S^2C_1LR_{out}+SL+R_{out}\right)+\frac{V_{out}\left(g_mR_{out}SL-R_{out}\right)}{S^2LC_2+1} \quad =0$$

$$V_{out}\left(S^4L^2C_1C_2R_{out}+S^3L^2C_2+S^2LC_2R_{out}+S^2C_1LR_{out}+SL+g_mR_{out}SL\right) \quad =0$$

$$V_{out}\left(S^3L^2C_1C_2R_{out}+S^2L^2C_2+SLC_2R_{out}+SLC_1R_{out}+L+g_mR_{out}L\right)=0 \qquad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.61)ทำการ Take Differential Equation ;

$$\frac{d^3V_{out}}{dt^3}\left(L^2C_1C_2R_{out}\right)+\frac{d^2V_{out}}{dt^2}\left(L^2C_2\right)+\frac{dV_{out}}{dt}\left(LC_2R_{out}+LC_1R_{out}\right)+\left(L+g_mR_{out}L\right) \quad =0$$

เขียนสมการช่วยได้ดังนี้

$$m^3\left(C_1C_2R_{out}\right)+m^2\left(L^2C_2\right)+m\left(LC_2R_{out}+LC_1R_{out}\right)+\left(L+g_mR_{out}L\right) \quad =0$$

จากสมการของผลเฉลยจะได้ว่า

$$V_{out}=Ae^{m_1t}+Be^{m_2t}+Ce^{m_3t}$$

ต้องการเอาต์พุตเป็นสัญญาณซายน์ ดังนั้นต้องกำหนด

$$m_1=j\omega \ , \ m_2=-j\omega \ , \ m_3=-k$$

จะได้สมการผลเฉลยดังนี้

$$\begin{aligned}(m+j\omega)(m-j\omega)(m+k) &=0\\ \left(m^2+\omega^2\right)(m+k) &=0\\ m^3+km^2+\omega^2m+k\omega^2 &=0\end{aligned} \qquad (2.62)$$

และจากสมการช่วยข้างต้นจะได้ว่า

$$m^3\left(L^2C_1C_2R_{out}\right)+m^2\left(L^2C_2\right)+m\left(LC_2R_{out}+LC_1R_{out}\right)+\left(L+g_mR_{out}L\right)=0$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.62)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m^3+\left(\frac{L^2C_2}{L^2C_1C_2R_{out}}\right)m^2+\left(\frac{LC_2R_{out}+LC_1R_{out}}{L^2C_1C_2R_{out}}\right)m+\left(\frac{L+g_mR_{out}L}{L^2C_1C_2R_{out}}\right)=0 \qquad (2.63)$$

จากนั้นทำการเทียบสัมประสิทธิ์จะได้ว่า

$$k=\frac{L^2C_2}{L^2C_1C_2R_{out}}=\frac{1}{C_1R_{out}}$$
$$\omega^2=\frac{LC_2R_{out}+LC_1R_{out}}{L^2C_1C_2R_{out}}=\frac{C_2+C_1}{LC_1C_2}$$

จากพจน์สุดท้ายของสมการที่ (2.63) ทำการเทียบสัมประสิทธิ์จะได้ว่า

$$k\omega^2=\frac{L+g_mR_{out}L}{L^2C_1C_2R_{out}}$$
$$\frac{1}{C_1R_{out}}\left(\frac{C_2+C_1}{LC_1C_2}\right)=\frac{L+g_mR_{out}L}{L^2C_1C_2R_{out}}$$
$$\frac{1}{C_1R_{out}}\left(\frac{C_2+C_1}{LC_1C_2}\right)L^2C_1C_2R_{out}=L+g_mR_{out}L$$
$$\left(\frac{C_2+C_1}{C_1}\right)L=L(1+g_mR_{out})$$
$$g_m=\frac{C_2}{C_1R_{out}}+\frac{C_1}{C_1R_{out}}-\frac{1}{R_{out}}$$
$$\therefore\quad g_m=\frac{C_2}{C_1R_{out}}$$

จากข้างต้นจะได้ว่า

$$k=\frac{1}{C_1R_{out}}$$
$$\omega^2=\frac{C_2+C_1}{LC_1C_2}$$
$$g_m=\frac{C_2}{C_1R_{out}}$$

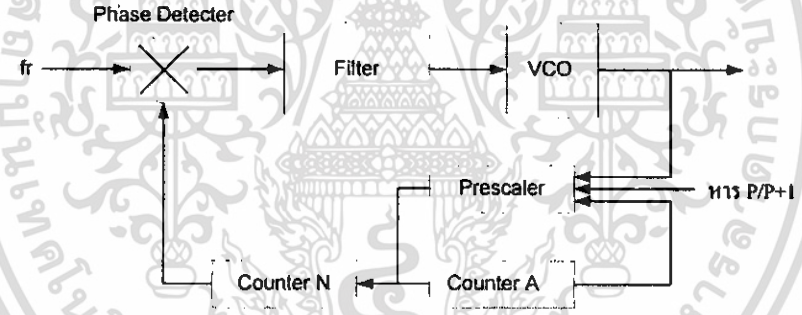
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกลูปแบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส

วงจรสังเคราะห์ความถี่มีอยู่หลายแบบ ตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกลูปแบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส ซึ่งมีขั้นตอนการตั้งความถี่ขั้น ละ f_R เท่ากับความถี่อ้างอิงวงจรเฟสล็อกลูปในรูปที่ 2.15 ใช้พรีสเกลเลอร์ซึ่งเป็นวงจรนับที่ตัวหาร เปลี่ยนค่าได้ระหว่าง P กับ P+1 เราเรียกพรีสเกลเลอร์แบบนี้ว่า "แบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส" วงจรนับหาร N, ซึ่งโปรแกรมตัวหารได้นั้นทำงานที่ความถี่ต่ำ

เหตุผลที่ใช้แบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส ก็เพื่อลดทอนความถี่ลง และให้ใช้กับวงจรหาร N ตระกูล TTL และ CMOS ได้ ทำให้สามารถสังเคราะห์ความถี่ไปถึงย่าน VHF , UHF ได้

ส่วนสำคัญของวงจร คือ แบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส ซึ่งเป็นไอซีตระกูล ECL มีความสามารถในการทำงานที่ความถี่สูง จะทำการหารล่วงหน้า (prescale) ก่อน และทำงานในลักษณะที่หารได้ 2 ค่าสลับกันในไอซีตัวเดียว โดยที่ตัวหารความถี่มีค่าต่างกันอยู่หนึ่ง คือ P และ P+1 เช่น หาร 64/65 เอาต์พุตของพรีสเกลเลอร์จะป้อนไปให้แก่วงจรเคาน์เตอร์ตระกูล TTL 2 ตัว ตัวหนึ่งเป็นเคาน์เตอร์หลัก (main counter) ส่วนอีกตัวเป็นเคาน์เตอร์เสริม



รูปที่ 2.17 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกลูปแบบพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส

เคาน์เตอร์เสริม จะเป็นตัวบังคับให้พรีสเกลเลอร์หารด้วย P หรือ P+1 สมมติว่าป้อนข้อมูลพรีเซตตัวเลขให้เคาน์เตอร์เสริม และขณะนี้พรีสเกลเลอร์ให้ P+1 เป็นตัวหาร เคาน์เตอร์เสริมจะนับก่อน หลังลงไปเรื่อยๆ เคาน์เตอร์หลักจะนับถอยหลังไปพร้อมๆ กับเคาน์เตอร์เสริม เมื่อเคาน์เตอร์เสริมหยุดนับจะส่งสัญญาณบังคับให้พรีสเกเลอร์เปลี่ยนเป็นหารด้วย P และเคาน์เตอร์หลักจะนับถอยหลังต่อไปจนเป็นศูนย์ เมื่อเคาน์เตอร์หลักและเคาน์เตอร์เสริมนับถึงศูนย์เมื่อใด ทั้งคู่จะถูกพรีเซตด้วยตัวเลขข้อมูล (ความถี่) ใหม่อีกครั้ง ดังนั้น ตัวเลขที่พรีเซตให้เคาน์เตอร์เสริม จะต้องน้อยกว่าตัวเลขที่พรีเซตให้เคาน์เตอร์หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติตัวเลขที่พรีเซตให้เคาน์เตอร์หลักเป็น N และเคาน์เตอร์เสริมเป็น A เริ่มแรกให้พรีสเกลเลอร์อยู่ในสภาวะหาร P+1 ซึ่งจะยังคงหารด้วย P+1 ไปจนกว่าเคาน์เตอร์เสริมจะนับลงเป็นศูนย์นั้น คือ เวลาที่ในการนับของเคาน์เตอร์เสริมเป็นศูนย์คิดเป็น จำนวนไซเคิลของ VCO ที่ผ่านไปเท่ากับ P+1 คูณด้วย A ไซเคิล

หลังจากนั้นพรีสเกลเลอร์จะถูกบังคับให้เปลี่ยนตัวหารเป็น P โดยสัญญาณบังคับจากเคาน์เตอร์ A ในขณะนี้เคาน์เตอร์หลักนับผ่านไปแล้ว A ยังเหลืออยู่ N-A นั้น คือ ต้องใช้เวลานับเคาน์เตอร์หลักคิดเป็นจำนวนไซเคิลของ VCO ที่ผ่านไปเท่ากับ P คูณด้วย N-A

ดังนั้นรวมค่าตัวหารทั้งหมดจะได้เท่ากับ

$$N_t = (P+1)A + P(N-A) = PN + A \qquad (2.64)$$

ความถี่ของ VCO จะเท่ากับ PN+A เท่าของความถี่อ้างอิงหรือ

$$F_{SYNTH} = F_{REF}(PN + A) \qquad (2.65)$$

2.12 วงจรภาคไอเอฟและดีมอดูเลเตอร์

วงจรไอเอฟและดีมอดูเลเตอร์ในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ 13135 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

-วงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ซึ่งจะทำหน้าที่ย้ายความถี่ของสัญญาณไปไว้ในช่วงที่ความถี่กลางซึ่งจะทำการย้ายความถี่ 2 ต่อ (Double conversion) โดยครั้งแรกย้ายความถี่ไปที่ 10.7 เมกกะเฮิร์ต ก่อนแล้วจึงย้ายความถี่ของสัญญาณอีกครั้งหนึ่งไปที่ 455 เฮิร์ต

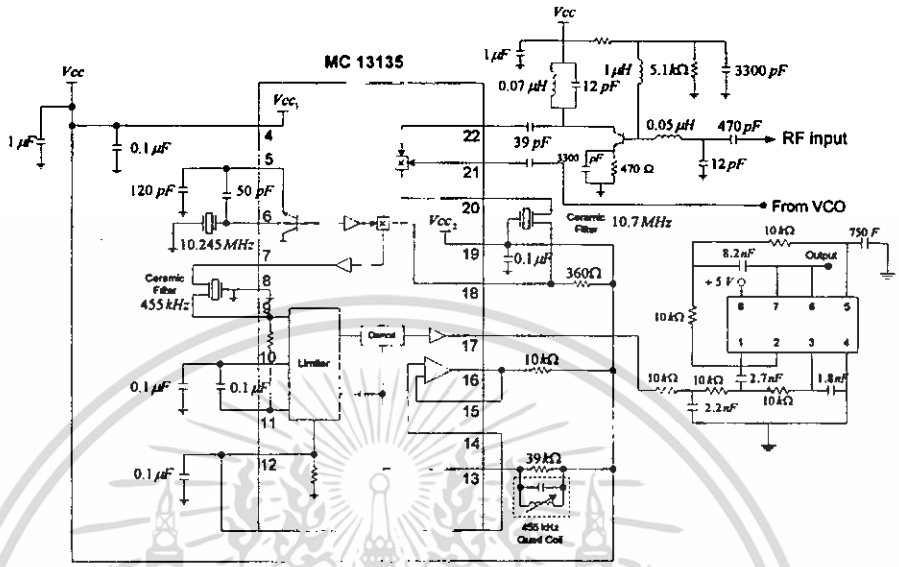
- เซรามิคฟิลเตอร์ (Ceramic filter) ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน 10.7 เมกกะเฮิร์ต เพื่อให้ได้ความถี่กลาง 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ ออกมา

-เซรามิคฟิลเตอร์ 455 กิโลเฮิร์ต ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน 455 กิโลเฮิร์ตเพื่อให้ได้ความถี่กลาง 455 กิโลเฮิร์ต ออกมาที่จะส่งเข้าไปที่วงจรขยายลิมิตเตอร์ในไอซี (13135) อีกครั้ง

-วงจรลิมิตเตอร์ (Limiter) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ได้จากเซรามิคฟิลเตอร์ให้แรงขึ้นและให้ได้ความถี่ขนาด 455 กิโลเฮิร์ต จริงๆ โดยการขลิบสัญญาณที่เกินออกเพื่อให้เอาต์พุตมีระดับสัญญาณที่สม่ำเสมอกันเพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณก่อนส่งไปยังวงจรดีเทคเตอร์ต่อไป

-วงจรดีเทคเตอร์จะทำการดีเทคสัญญาณที่รับมาจากวงจรลิมิตเตอร์ให้เป็นสัญญาณข่าวสารดั้งเดิมที่ทำการส่งมา ซึ่งลักษณะวงจร ใช้งานจะเป็นดังรูป 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงแผนผังของไอซีเบอร์ 13135

2.13 วงจร LOW PASS FILTER

Low pass filter คือวงจรกรองความถี่ ที่ให้ความถี่ผ่านไปได้ โดยมีการสูญเสียน้อยมาก และลดทอนความถี่สูงให้ต่ำลง

$$\alpha = -A \text{ dB}$$

$$A = 20\log[T(j\omega)] \text{ dB}$$

Specifications ของ low pass filter ถูกกำหนดไว้ดังรูป

เราจะหา Butterworth Response ได้ว่า

$$\alpha = 10 \log\left[1+\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}\right] \text{dB}$$

$$10^{\alpha/10} = 1+\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}$$

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\left(10^{\alpha/10}-1\right)^{1/2n}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์จะได้ว่า

$$\left(\frac{\omega_p}{\omega_0}\right)^{2n} = 10^{\alpha_{max}/10} - 1, \left(\frac{\omega_s}{\omega_0}\right)^{2n} = 10^{\alpha_{min}/10} - 1$$

นำมาหารกันจะได้ว่า

$$\left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)^{2n} = \frac{10^{\alpha_{min}/10} - 1}{10^{\alpha_{max}/10} - 1}$$

จัดรูปแบบสมการเราสามารถหา n ได้จาก

$$n = \log \frac{\left[\left(10^{\alpha_{min}/10} - 1\right)/10^{\alpha_{max}/10} - 1\right]}{2\log\left(\omega_s/\omega_p\right)}$$

2.14 การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตอนุกรม

ในการออกแบบโปรแกรมควบคุมในส่วนของคอมพิวเตอร์นั้น มีหลายโปรแกรมที่สามารถนำมาใช้งานได้ ในโครงงานนี้เราได้เลือกใช้โปรแกรม Visual Basic เพราะเป็นโปรแกรมที่ออกแบบหน้าจอและใช้งานง่าย พร้อมทั้งยังมี component MSComm เพื่อใช้ในการติดต่อผ่านพอร์ตอนุกรมอีกด้วย

ในการเขียนโปรแกรมสามารถทำได้โดยใช้ VB control ที่ชื่อว่า MSComm ก็จะปรากฏเป็นรูปไอคอนโทรศัพท์สีเหลือง ให้คลิกที่ไอคอนลากมาวางไว้บนฟอร์มในโปรเจคของโปรแกรมเรา

การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตอนุกรม สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1.การติดต่อแบบอินเตอร์รัปต์

ขบวนการอินเตอร์รัปต์ อุปกรณ์รอบข้างเกือบทุกชิ้นจะต้องปฏิบัติงานอยู่เพื่อส่งสัญญาณไปให้แก่ซีพียูเสมอ ถ้าอุปกรณ์นั้นพร้อมที่จะรับส่ง อุปกรณ์จะส่งเป็นรหัสแอสกี้ เราจะเขียนโปรแกรมอินเตอร์รัปต์โดยเมื่อที่ข้อมูลเข้ามาก็ทำให้มี CommEvent กับ OnCommEvent

2.การติดต่อแบบโพลลิ่ง

ในระบบพีซี การโพลมีบ้างที่ใช้การส่งผ่านข้อมูลระหว่าง เทอร์มินัล กับซีพียู กรณีข้อมูลเป็นประเภทไบต์ที่ส่งจากคีบอร์ดโดยวิธีนี้จะทำการตรวจสอบคีบอร์ดว่ามีข้อมูลส่งมาหรือเปล่าโดยจะตรวจสอบตลอดเวลาการทำงานกับข้อมูลที่รับเข้ามาจะตรวจสอบด้วยความเร็วที่สูงกว่าอัตราความเร็วข้อมูลที่ส่งเข้ามาทางคีย์บอร์ด การที่ซีพียูส่งสัญญาณออกไปตรวจสอบพบว่ามีข้อมูลที่ต้องส่งเข้ามา เรียกว่า "Wait Poll" ซึ่งจะเสียช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90 เปอร์เซ็นต์ คาบเวลาที่เสียไปนั้น เราเลี่ยงไปใช้เทคนิคการโพลแบบ "Round Robin" แทน แต่ใน Visual Basic เราจะ ใช้การตรวจสอบข้อมูลที่มาพอร์ตอนุกรมตลอด โดยจะใช้คอนโทรล ไทเมอร์ เข้ามาช่วยในการเขียนโปรแกรมซึ่งสามารถตรวจสอบได้ถึงระดับ 1 มิลลิวินาที หรือจะใช้ Do...Loop ก็ได้

ในตัวคอนโทรล MSComm มี Event ที่ใช้เพียง Event เดียวเท่านั้นเอง ก็คือ OnComm Event ซึ่งจะใช้ในการติดต่อแบบอินเตอร์รัปต์การเขียนโปรแกรมติดต่อพอร์ตอนุกรมแบบธรรมดาจะใช้CommEvenแพียง CommEvRecieve,ComEvSendถ้าเป็นการติดต่อสื่อสารแบบโมเด็มจะใช้หลายตัวในการตรวจสอบสัญญาณ

องค์ประกอบในการใช้ MSComm

การติดตั้งกับพอร์ต

CommPort	คือ เราต้องกำหนดหมายเลขพอร์ตที่ใช้ต่อ RS-232(Com1,Com2)
Setting	คือเราต้องกำหนดอัตราบอดเรต,พาริตี้,เดต้า(จำนวนบิต) และ บิตสุดท้าย ตัวอย่าง 9600,n,8,1 เป็นต้น
HandShaking	เราจะกำหนดได้ 4 แบบ 1.commNone 2.comXonXoff 3.comRTS 4.comTRSXoffXon

การใช้บัฟเฟอร์ในการรับข้อมูล

InBuffersize	คือ การกำหนดบัฟเฟอร์ในการรับข้อมูลเข้ามา
OutBuffersize	คือ การกำหนดบัฟเฟอร์ในการส่งข้อมูลออกไป
Rthreshold	คือ การที่เรากำหนดการเกิด Event-driven ในการรับข้อมูลเข้ามา
Sthrehold	คือ การที่เรากำหนดการเกิด Event-driven ในการส่งข้อมูลออกไป
Inputlen	คือ จำนวนของข้อมูลที่ไปอ่านในบัฟเฟอร์รับข้อมูล
EOFEnable	คือ การที่บอกว่าสิ้นสุดของไฟล์ (End Of File : EOF)

ด้านฮาร์ดแวร์

ParityReplace	คือ ค่าของคาแรกเตอร์ที่จะแทนเมื่อเกิดพาริตี้ผิดพลาด
NullDiscard	คือ การกำหนดให้รับหรือไม่รับ Null Character
RTSEnable	คือ ทำให้มีสัญญาณ RTS (Request To Send)
DTSEnable	คือ ทำให้มีสัญญาณ DTR (Data Terminal Ready)

การกำหนดคุณสมบัติของ MSComm Control ให้สามารถติดต่อกับพอร์ตได้

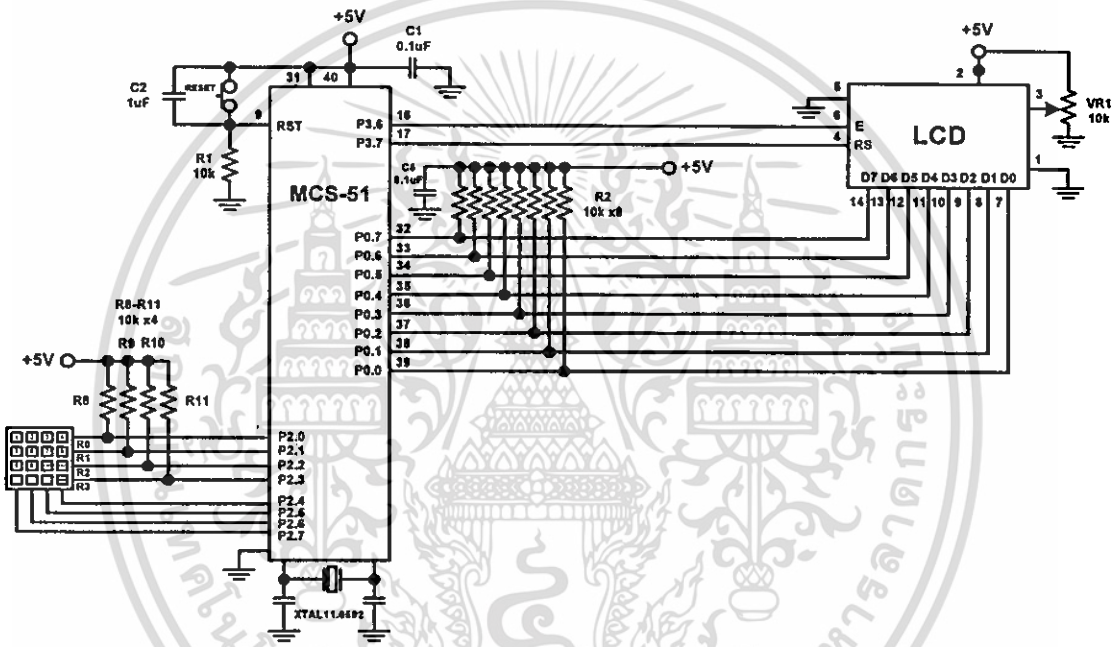
Property ชื่อ CommPort คือ เลือกคอมพอร์ตที่เราจะต่อใช้งาน เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การคำนวณและการสร้าง

3.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

โครงงานนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำงานในการรับค่ารายการอาหารจากผู้ใช้และแสดงผลทางจอแอลซีดี โดยทำการต่อคีย์แพดแบบเมตริกซ์ขนาด 4 x 4 มาใช้เป็นตัวรับค่าและต่อโมดูลแอลซีดีมาเป็นตัวแสดงผล ดังรูปที่ 3.1

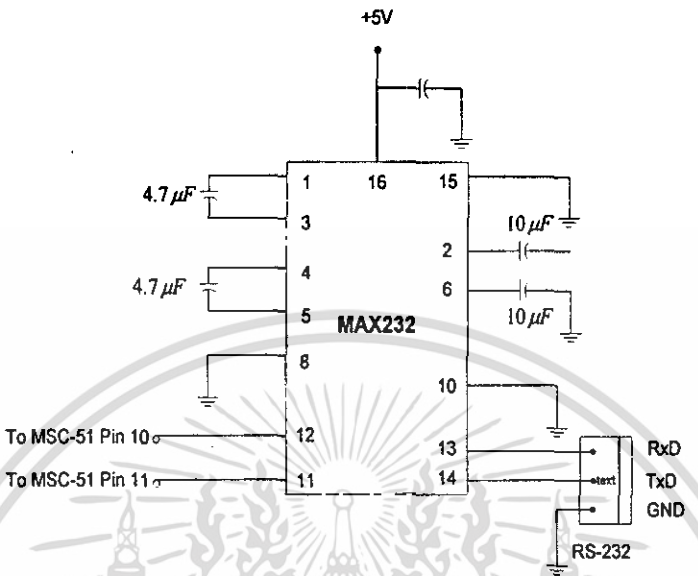


รูปที่ 3.1แสดงการเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์กับคีย์แพดและโมดูลแอลซีดี

3.2 วงจรเชื่อมต่อ MAX 232 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

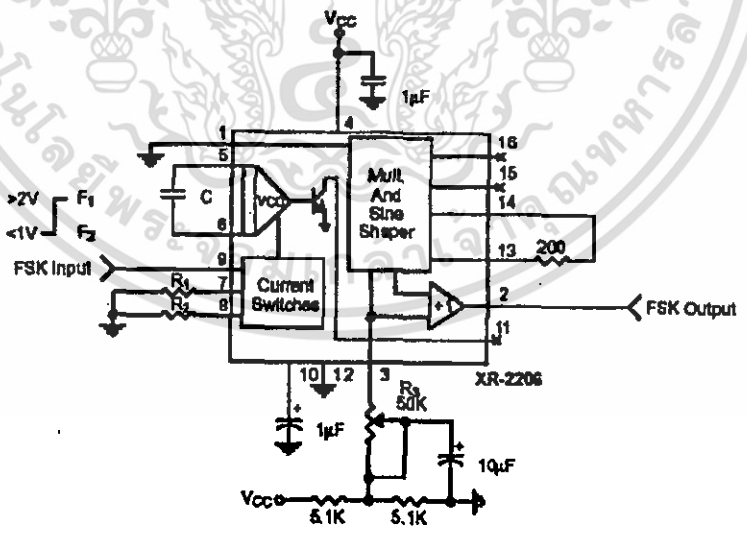
ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ติดต่อเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรมในมาตรฐาน RS-232 จะต้องอาศัยการเชื่อมต่อผ่านไอซีพิเศษที่ทำหน้าที่ในการแปลงระดับสัญญาณ ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ไอซี MAX232 ซึ่งใช้ในการแปลงข้อมูลส่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 จากระดับทีทีแอลไปเป็นระดับของ RS-232 และทำการแปลงข้อมูลรับจากคอมพิวเตอร์จากระดับของ RS-232 เป็นระดับทีทีแอลเพื่อให้สามารถถ่ายทอดไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยในรูปที่3.2 แสดงวงจรในการต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.2 วงจรเชื่อมต่อ MAX232 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

3.3 วงจรฟรีเควนซีชิพคีย์อิ้งมอดูเลเตอร์ (Frequency Shift Keying Modulation)



รูปที่ 3.3 บล็อคไดอะแกรมของไอซีเบอร์ XR2206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้เลือกใช้ไอซี XR2206 ซึ่งเป็นอุปกรณ์โมโนลิทิลฟังช์เจนเนอเรเตอร์ (Monolithic function generator) ใช้งานสำหรับสร้างสัญญาณซายน์ (sine),สี่เหลี่ยม (triangle),แรมพ์ (ramp),พัลส์ (pulse) ที่มีคุณภาพ เสถียรภาพและมีความเที่ยงตรงส่ง รูปคลื่นเอาต์พุตได้ทั้งทางขนาดและความถี่ ค่าแรงดันภายนอก โดยมีช่วงความถี่ใช้งานตั้งแต่ 0.01 เฮิรตซ์ ถึง 1 เฮิรตซ์ ไอซีเบอร์นี้เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสาร ในระบบเครื่องมือวัดและระบบที่ต้องการแหล่งกำเนิดสัญญาณซายน์ เอเอ็ม เอฟเอ็ม หรือสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแบบเลื่อนความถี่ มีค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนของอุณหภูมิเป็น 20 ppm/องศาเซลเซียล ความถี่ ออสซิเลเตอร์สามารถกวาดเป็นเชิงเส้นได้สูงกว่า 2000 : 1 ช่วงความถี่ โดยการควบคุมของแรงดันภายนอกในขณะที่มีความเพี้ยนต่ำ

XR2206 ประกอบด้วย 4 ภาคการทำงาน ได้แก่ ส่วนแรงดันควบคุมการ (Voltage Controlled Oscillator : VCO) วงจรคูณอนาลอก วงจรปรับสัญญาณสวิตช์กระแส ส่วนแรงดันควบคุมการทำงานของออสซิเลเตอร์จะผลิตเอาต์พุตความถี่ที่เป็นสัดส่วน กระแสอินพุต ซึ่งสามารถกำหนดได้โดยตัวต้านทานที่ต่อเข้าที่ขาที่เกี่ยวกับเวลาลงกราวด์ เนื่องจากมี 2 ขาที่เกี่ยวกับเวลา ดังนั้นจึงสามารถสร้างสัญญาณได้ 2 ความถี่ สำหรับการกำเนิดสัญญาณเอฟเอสเค โดยใช้ขาควบคุมสัญญาณเอฟเอสเค (FSK Input Control) ค่านี้จะไปควบคุมวงจรภายในส่วนสวิตช์กระแสเพื่อให้เกิดการเลือกขาที่ต่อตัวทานสำหรับวงจรใจส่วนแรงดันควบคุมการทำงานของออสซิลเลเตอร์

การเข้ารหัสแบบเอฟเอสเค XR 2206 สามารถใช้งานโดยตัวต้านทาน (Timing resistor) 2 ตัวแยกกัน (R_1, R_2) ที่ขา 7 และ ขา 8 ของ XR 2206 ดังรูปที่ 3.3 โดยตัวต้านทานแต่ละตัวจะถูกใช้นั้นขึ้นอยู่กับสัญญาณลอจิกที่เข้ามาที่ขา 9 ของ XR 2206 หากขา 9 เปิดวงจรหรือต่ออยู่กับสัญญาณที่แรงดันสูงกว่าหรือเท่ากัน 2 โวลต์ แล้ว R_1 จะเป็นตัวต้านทานกำหนดเวลา ทำนองเดียวกันหากขา 9 ต่ออยู่กับสัญญาณที่ศักดาต่ำกว่าหรือเท่ากับ 1 โวลต์แล้ว R_2 จะเป็นตัวต้านทานกำหนดเวลา ดังนั้นความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตสามารถเข้ารหัสเป็น 2 ระดับที่มีความถี่เป็น f_1 และ f_2 คยที่

$$f_1 = 1/(R_1 * C)$$
$$f_2 = 1/(R_2 * C)$$

ระดับแรงดันไฟตรงของเอาต์พุตที่ขา 2 ประมาณเท่ากับแรงดันไฟตรงที่ไบอัสเข้าที่ขา 3 ของไอซี ซึ่งจากรูปที่ 3.3 ขา 3 ถูกไบอัสด้วยครึ่งหนึ่งของค่าแรงดัน V+ เทียบกับกราวด์ ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุตเท่ากับ V/2

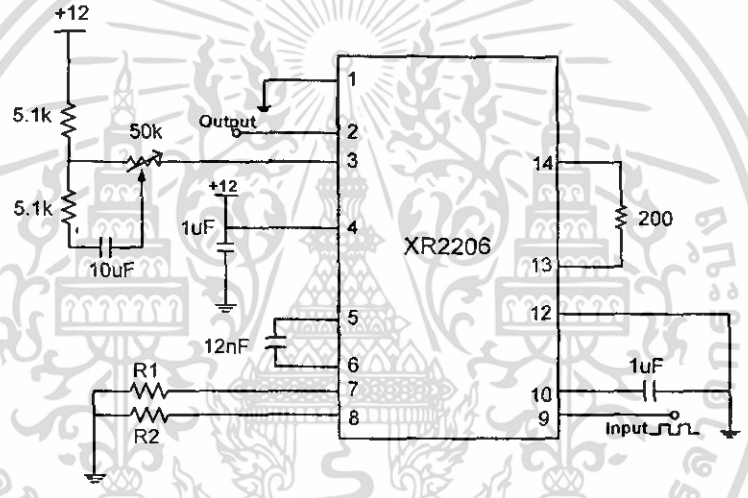
ฮาร์โมนิคที่เกิดขึ้นของคลื่นซายน์สามารถลดลงเหลือ 0.5% โดยการเพิ่มตัวต้านทานค่าประมาณ 200 โอห์ม ที่ขา 13 และขา 14 ของไอซีโดยแท็บ (Tap) ตรงกลางของตัวต้านทานปรับค่าได้ประมาณ 500 โอห์ม แล้วทำการปรับความสมมาตร (Symmetry) ที่ขา 15,16 ก่อน จากนั้นจึงปรับความเพี้ยน (Distortion) ที่ขา 13,14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดลองนี้ใช้ค่าความถี่สเปซ 2400 เฮิรตซ์ และความถี่มาร์ค 5400 เฮิร์ต ดังนั้นจะได้ค่าอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

$$R_1 = 1/(f_1 * C)$$
$$R_2 = 1/(f_2 * C)$$

โดย f_1 = 2400 เฮิร์ต และเลือกใช้ C =12 nF ดังนั้นคำนวณค่า R_1 ได้เท่ากับ 34.7 kΩ
โดย f_2 = 5400 เฮิร์ต และเลือกใช้ C =12 nF ดังนั้นคำนวณค่า R_2 ได้เท่ากับ 15.4 kΩ
ดังนั้นรูปวงจรที่ได้จะเป็น



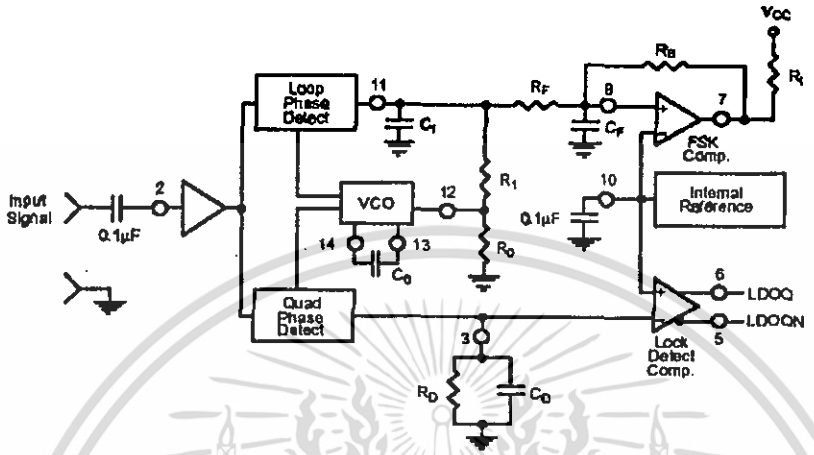
รูปที่3.4 วงจรไอซีเบอร์ XR2206

3.4 วงจรฟรีเควนซีชิฟคีย์อิ้งดีมอดูเลเตอร์ (Frequency Shift Keying Demodulation)

XR2211 เป็นวงจรเฟสล็อคลูปแบบโมโนลิธิค (Monolitic) ซึ่งออกแบบมาสำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารข้อมูล โดยเฉพาะลักษณะพิเศษของไอซีเบอร์นี้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นตัวถอดรหัสแบบฟรีเควนซีชิฟคีย์อิ้ง ไอซีทำงวนในช่วงกว้างของไฟเลี้ยงคือ 4.5 โวลต์ ถึง 20 โวลต์และมีช่วงความถี่ที่กว้างโดยอยู่ในช่วง 0.01 เฮิรตซ์ ถึง 300 เฮิรตซ์ สามารถใช้สัญญาณอนาลอกได้ในช่วง 2 มิลลิโวลต์ถึง 3 มิลลิโวลต์ อีกทั้งยังสามารถอินเทอร์เฟสได้กับทั้งวงจรลอจิกตระกูลดีทีแอล (DT) ,ทีทีแอล (TTL) และอีซีแอล (ECL) วงจรภายในประกอบด้วยวงจรเฟสดีเท็คเตอร์ สำหรับติดตามสัญญาณอินพุตในช่วงแถบผ่าน,วงจรควอดเดรเจอร์เฟสดีเท็คเตอร์ (Quadrature Phase Detector) ใช้สำหรับตรวจสอบสัญญาณพาห์ และตัวเปรียบเทียบแรงดันฟรีเควนซี่ชิฟคีย์อิ้ง (FSK voltage comparator)ใช้สำหรับดีมอดูเลตสัญญาณฟรีเควนซี่ชิฟคีย์อิ้งกับอุปกรณ์ที่ต่อภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดได้อย่างอิสระ แรงดันอ้างอิงภายในเป็นสัดส่วนกับไฟเลี้ยงวงจร ดังนั้นเหมาะสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสมรรถภาพต่ำเมื่อไฟเลี้ยงวงจรเปลี่ยนแปลง



รูปที่3.5 บล็อคไดอะแกรมของไอซีเบอร์ XR2211

เอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์ให้สัญญาณผลบวกและผลต่างความถี่ของสัญญาณอินพุตกับสัญญาณอินพุตกับสัญญาณจากวงจรแรงดันควบคุมออสซิลเลเตอร์นั้นคือ ความถี่เอาต์พุตจะเป็น f(in)+f(vco) และ f(in)-f(vco) ดังนั้นในขณะล็อคความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็น 2f(in) และ 0 เฮิร์ต โดยการต่อตัวเก็บประจุคร่อมสัญญาณเอาท์ของเฟสดีเท็คเตอร์ คือ ใส่วงจรกรองความถี่ต่ำนั้นเอง จะทำให้สัญญาณความถี่สูง f(in)+f(vco) ถูกลดทอนไปทำให้เหลือเพียงแรงดันกระแสตรงที่เกิดจากความต่างเฟสของความถี่ทั้งสองเกิดขึ้นเช่นนี้เรื่อยๆ ทำให้วงจรแรงดันควบคุมออสซิลเลเตอร์ติดตามความถี่ของสัญญาณอินพุตได้

ส่วนที่เหลือของ XR2211 ทำงานดังนี้คือ หากวงจรแรงดันควบคุมออสซิลเลเตอร์ถูกขับด้วยความถี่สูงกว่าหรือต่ำกว่าความถี่ศูนย์กลางแล้ววงจรเปรียบเทียบแรงดันสร้างสัญญาณเอาต์พุตลอจิกสูงและสัญญาณเอาต์พุตที่ลอจิกต่ำ เพื่อเฟสล็อกลูปอยู่ในช่วงล็อก (Quadrature phase detector and lock detector comparator)

การถอดรหัสสัญญาณที่เข้ารหัสแบบเลื่อนความถี่เอฟเอสเค รูปที่ 3.5 แสดงการต่อพื้นฐานของวงจรถอดรหัสแบบเอฟเอสเคโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 หน้าที่ของอุปกรณ์ภายนอกแต่ละตัวเป็นดังนี้ R_0 และ C_0

กำหนดความถี่ศูนย์กลางของเฟสล็อกลูป R_1 กำหนดแถบความถี่ของระบบ C_1 ใช้กำหนดค่าเวลาในวงจรกรองความถี่แบบวนรอบ(Loop Damping) สำหรับข้อมูลเอาต์พุตของสัญญาณเอฟเอสเค(R_B=510 kΩ) จากขา 7 ไปขา 8 มีไว้เพื่อเป็นการป้อนกลับแบบบวกสำหรับตัวเปรียบเทียบแรงดันของสัญญาณเอฟเอสเคเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการเปลี่ยนสถานะลอจิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรตามรูปที่3.5 สามารถใช้ได้กับวงจรถอดรหัสเอฟเอสเคทั่วๆไปโดยการเลือกอุปกรณ์ต่อภายนอกสำหรับการกำหนดความถี่มาร์คและความถี่สเปซ(f_1, f_2)ค่าพารามิเตอร์สามารถคำนวณได้จากคำนวณความถี่ศูนย์กลางของเฟสล็อกลูป f_0

$$\begin{aligned} f_0 &= \sqrt{f_1 f_2} \\ &= \sqrt{2400 \times 5400} \\ &= 3600\,Hz \end{aligned}$$

เลือกค่าของตัวต้านทานกำหนดเวลา R_0 ให้อยู่ในช่วง 10 กิโลโอห์ม ถึง 100 กิโลโอห์ม โดยสามารถเลือกได้ตามใจชอบสำหรับค่าอ้างอิงของ R_0 เป็น 20 กิโลโอห์ม ซึ่งต่อความต้านทานปรับค่าได้ไว้สำหรับค่าละเอียด(R_X)

$$\begin{aligned} R_T &= R_0 + \frac{R_x}{2} \\ &= 20 + \frac{20}{2} \\ &= 30\,k\Omega \end{aligned}$$

คำนวณค่าของ C_0 จากสมการ

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{R_0 f_0} \\ &= 9.26nF \end{aligned}$$

คำนวณค่า R_1 เพื่อกำหนด ความเบี่ยงเบนของความถี่มาร์ค และความถี่สเปซ

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_0 f_0}{f_1 - f_2} \times 2 \\ &= \frac{20k\Omega \times 3600 \times 2}{3000} \\ &= 48\,k\Omega \end{aligned}$$

คำนวณค่า C_1 เพื่อกำหนดการวนรอบ โดยค่าการวนรอบมีค่าอ้างอิงเท่ากับ ½ แล้ว

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1250 C_0}{R_1 \zeta^2} \\ &= \frac{1250 \times 9.26n}{48k \times (0.5)^2} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.96nF$$

คำนวณค่า R_f

$$R_f = 5R_1$$
$$= 48k \times 5$$
$$= 424.26k\Omega$$

คำนวณค่า R_B

$$R_B = 5R_f$$
$$= 240k \times 5$$
$$= 2.121M\Omega$$

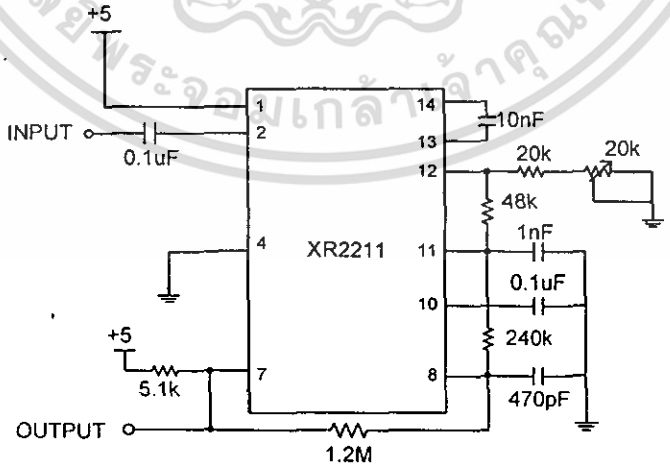
และคำนวณค่า R_{SUM} ได้จาก

$$R_{SUM} = \frac{(R_f + R_1) \times R}{(R_f + R_1 + R_B)}$$
$$= 232.258\ k\Omega$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่า C_f

$$C_f = \frac{0.25}{R_{SUM} \times Baudrate}$$
$$= 0.45nF$$

วงจรที่ได้จะเป็นดังรูป



รูปที่3.6 วงจรของไอซีเบอร์ XR2211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบที่ใช้เฟสล็อกลูป

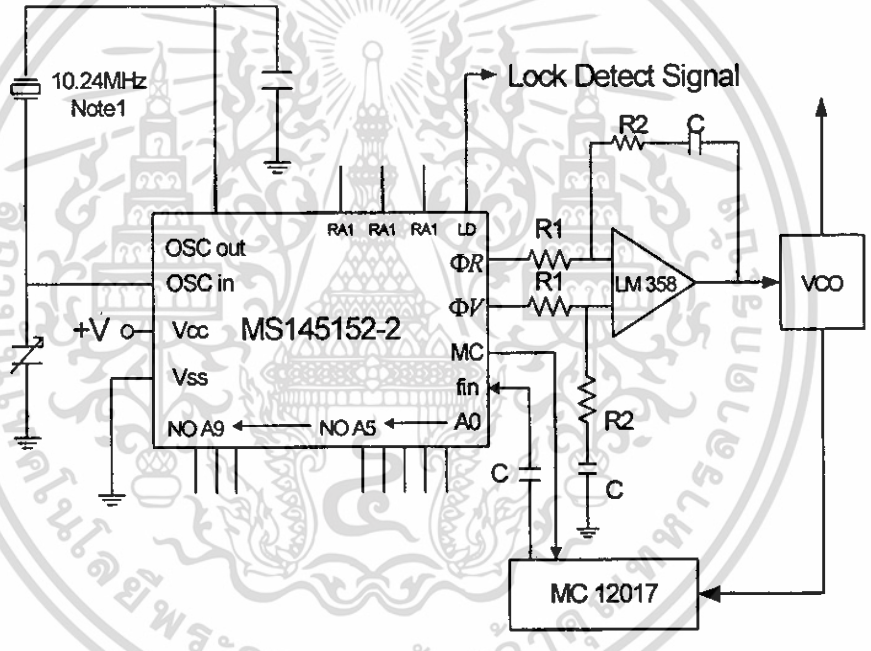
ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้

1.วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรง (VCO)

2. วงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส

3. วงจรเปรียบเทียบเฟส

4. วงจรฟิลเตอร์



รูปที่ 3.7 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (VCO)

ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ครบคุมด้วยแรงดันแบบโคลพิตต์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้ JFET เบอร์ J310 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาต์พุต (I_D) แรงดันที่ใช้ควบคุมการเปลี่ยนแปลง (V_{GS}) เป็นไปตามสมการกำลังสอง

$$I_{DS} = I_{DSS}\left[1-\left(\frac{V_{GS}}{V_P}\right)\right]^2$$

การคำนวณหาจุด Q ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดัน จะใช้สมการกฎกำลังสองและสมการโหลดไลน์ (Load Line)ของไบอัสตัวเอง (self-bias)คือ

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ J310 จากดาต้าชีตดังนี้

$$I_{DSS} = 40mA$$
$$V_P = -4V$$
$$R_S = 100\Omega$$

ทำการแก้สมการเพื่อหาจุด Q ดังนั้นจะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$I_{DQ} = 15.278mA$$
$$V_{GSQ} = -1.5278V$$

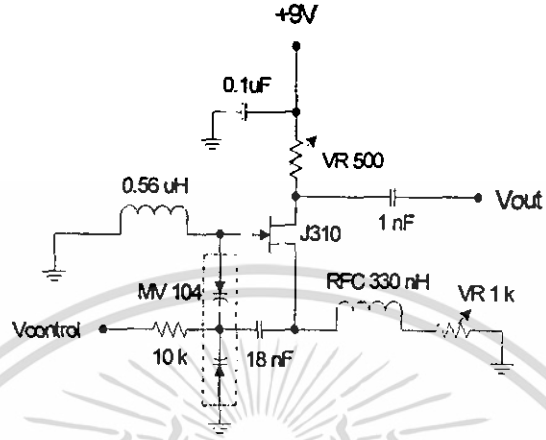
และคำนวณหาค่า L,C_1 และC_2 ได้จากสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}$$

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

จะได้วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันดังรูปที่3.8

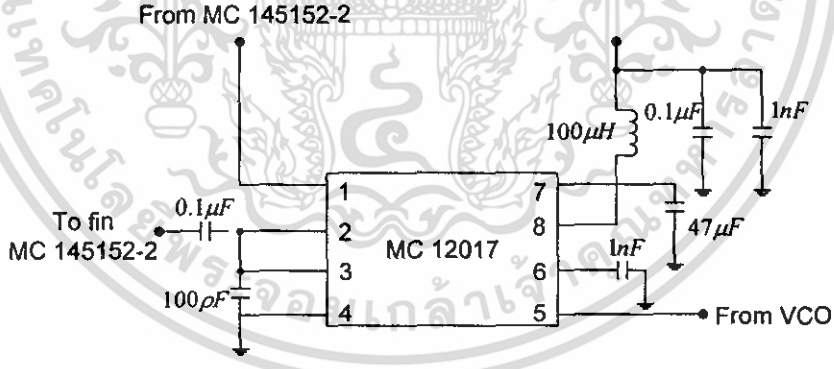
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดสัญญาณปรับความถี่ได้ตามแรงดันควบคุม (VCO)

3.5.2 วงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส

พรีสเกลเลอร์เป็นตัวหารความถี่ที่เข้ามาให้ต่ำลง เพื่อที่จะป้อนให้กับวงจรเฟสดีเทกเตอร์ได้ไอซีเบอร์ MC 12017 ซึ่งจะถูกตั้งหารเท่ากับ 64/65 โดยทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การต่อวงจรของไอซี MC 12017

3.5.3 วงจรเปรียบเทียบเฟส

เป็นวงจรที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณที่ได้จากวงจรวีซีโอกับเฟสความถี่อ้างอิงโดยวงจรสังเคราะห์ความถี่จะสามารถได้โดยตรงตามความถี่ที่เราต้องการก็ต่อเมื่อ เฟสของทั้งสองส่วนนี้เท่ากัน ในการทดลองนี้จะใช้ไอซีเบอร์ MC151152 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถโปรแกรมได้ 16 บิต โดย 10 บิต บนจะกำหนดจาก N เคาน์เตอร์ และ 6 บิตล่างจะกำหนดจาก A เคาน์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเรากำหนดให้ภายในไอซีมีความถี่อ้างอิง 10 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งในส่วนของความถี่อ้างอิงนี้จะใช้คริสตอลออสซิลเลเตอร์ 10.24 เมกกะเฮิรตซ์เป็นตัวอ้างอิงโดยเราจะสามารถหารความถี่ของคริสตอลออสซิลเลเตอร์ให้มีความถี่เท่ากับความถี่อ้างอิงที่เราต้องการคือ10 กิโลเฮิรตซ์ ได้โดยการกำหนดค่า RA0,RA1 และ RA2 เป็น 1 0 1 ตามลำดับ ซึ่งจาก data sheet จะเห็นว่าเมื่อเรากำหนดค่า RA0,RA1และ RA2 ซึ่งจะต่อเข้ากับขา 4,5,6 ของตัวไอซีเป็นค่า 1 0 1 แล้วก็จะทำให้ตัวหารเป็น 1024 ดังนั้นเมื่อนำไปหารค่าความถี่ของคริสตอลออสซิลเลเตอร์แล้ว ก็จะทำให้ได้ค่าความถี่อ้างอิงออกที่ขา OSC_{out} (ขา 26) มีค่าเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ตามที่เรากำหนด การที่เราจะโปรแกรมให้วงจรสามารถผลิตความถี่ที่เราต้องการนั้นสามารถคำนวณได้จากสามารถด้านล่าง เมื่อได้ค่า N และ A แล้วก็ต้องทำการแปลงให้เป็นค่าในเลขฐานสองก่อนที่จะเข้าสู่วงจร

$$N_t = NP + A$$

โดยที่ N_t คือ ความถี่ที่เราต้องการหารด้วยค่าความถี่อ้างอิง

N คือ ความโปรแกรม $N_0 - N_9$ =10 บิต ซึ่งเป็นตัวหารตั้งแต่ 63-1023

A คือ ความโปรแกรม $A_0 - A_5$ = 6 บิต ซึ่งเป็นตัวหารตั้งแต่ 0-63

P คือ ตัวหารของวงจรพรีสเกลเลอร์

การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าต่างๆดังนี้

N_t = 135.7 เมกกะเฮิรตซ์

P = 64

N = 212

A = 2

ค่า N และ A นี้เราจะป้อนโดยการโปรแกรมจากดิพสวิทช์ (DIP Switch)

N = 212 =11010100

A = 2= 00000010

การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าต่างๆดังนี้

N_t = 136.7 เมกกะเฮิรตซ์

P = 64

N = 213

A = 38

ค่า N และ A นี้เราจะป้อนโดยการโปรแกรมจากดิพสวิทช์ (DIP Switch)

N = 213 =11010101

A = 38= 00100110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$N_t = 125 \text{ เมกกะเฮิรตซ์}$$

$$P = 64$$

$$N = 195$$

$$A = 20$$

ค่า N และ A นี้เราจะป้อนโดยการโปรแกรมจากดิพสวิทช์ (DIP Switch)

$$N = 195 = 11000011$$

$$A = 20 = 00010100$$

การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์ จะได้ค่าต่างๆดังนี้

$$N_t = 126 \text{ เมกกะเฮิรตซ์}$$

$$P = 64$$

$$N = 196$$

$$A = 56$$

ค่า N และ A นี้เราจะป้อนโดยการโปรแกรมจากดิพสวิทช์ (DIP Switch)

$$N = 196 = 11000100$$

$$A = 56 = 00111000$$

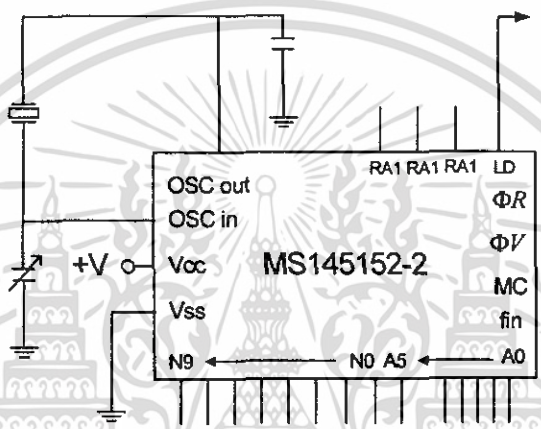
โดย N จะเป็น 10 บิตบน และ A จะเป็น 6 บิตล่าง ซึ่งเมื่อเรียงกันจะได้เป็น 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 โดยตัวเลขด้านขวามือสุดคือค่า A_0 ซึ่งจะต้องต่อเข้าขา 23 ของไอซี และตัวแรกด้านซ้ายมือสุดจะเป็นค่า N_9 ซึ่งจะต้องต่อเข้าขา 20 ของตัวไอซี (ซึ่งการนับจะนับจากขวาไปซ้าย โดยเริ่มจาก A_0 ไปจนถึง A_5 และต่อด้วย N_0 จนถึง N_9 ตามลำดับ) และต้องป้อนไฟเลี้ยง 5 โวลต์ให้แก่วงจร โดยต่อเข้าขา V_{DD} (ขา 3) ส่วนขา V_{SS} (ขา 2) จะต่อลงกราวนด์ สัญญาณอินพุตจากพรีสเกลเลอร์จะถูกคับปลิ้งเข้ามาทางขา f_{in} (ขา 1) สัญญาณอินพุตนี้จะเป็นเสมือน clock เข้าไปทริกให้หารด้วย N และ A ขา ϕ_R (ขา 7) และขา ϕ_V (ขา 8) นั้นจะต่อเข้าเป็นอินพุตของวงจรลูปฟิลเตอร์ ซึ่งถ้าความถี่ f_V มากกว่า f_R หรือถ้าเฟสของ f_V นำอยู่จะทำให้ ϕ_V เป็นสัญญาณระดับต่ำ และ ϕ_R เป็นสัญญาณระดับสูง และถ้าความถี่ของ f_V เท่ากับ f_R และเฟสตรงกันจะทำให้ ϕ_V และ ϕ_R จะเป็นสัญญาณระดับสูงตลอด แต่ก็จะมีช่วงหนึ่งที่เป็นสัญญาณระดับต่ำ คือช่วงที่ทั้งสองเป็นสัญญาณระดับต่ำพร้อมกัน ซึ่งความต่างเฟสของ ϕ_R และ ϕ_V จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าไฟตรงเพื่อส่งไปชดเชยที่วงจรวีซีโอ ให้ผลิตความถี่ได้ตรงตามที่เราต้องการ

ส่วนขา MC (ขา 9) นั้นจะต่อไปยังวงจรพรีสเกลเลอร์เพื่อกำหนดว่าขณะนั้นพรีสเกลเลอร์จะต้องหารด้วยค่าอะไร โดยสัญญาณที่ออกจากขา MC จะเป็นสัญญาณ square wave โดยเริ่มต้นจะมีระดับสัญญาณต่ำจนกว่าเคาน์เตอร์ A จะนับลดลงจนเป็น 0 หลังจากนั้นก็เปลี่ยนเป็นสัญญาณระดับสูงจนกว่าเคาน์เตอร์ N จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

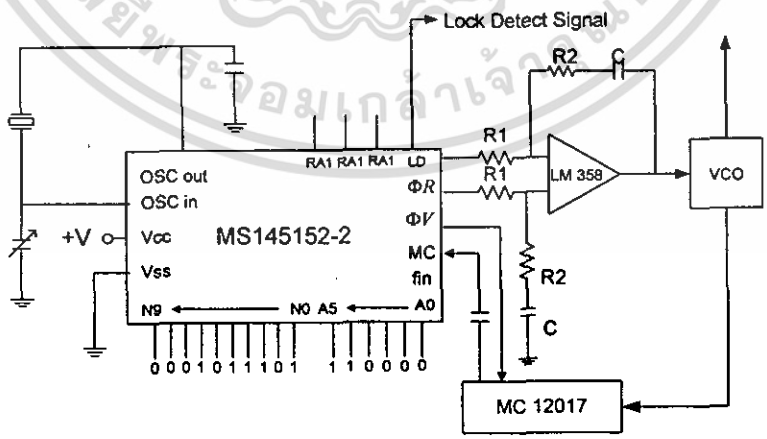
นับส่วนที่เหลือจากการนับไปพร้อมกับเคาน์เตอร์ A จนหมด (เพราะว่าขณะที่ A นับลดลง N ก็จะนับลดลงไปด้วย เพราะฉะนั้นเมื่อ A นับลดลงจนเป็น 0 แล้ว N จะต้องนับอีก (N-A) ครั้งจึงเท่ากับ 0) และ MC จะกลับไปเป็นสัญญาณระดับต่ำอีกครั้งเมื่อเคาน์เตอร์ถูกรีเซตด้วยค่าที่โปรแกรมไว้อีกครั้ง

ขา LD (Lock Detector Output) ขา 28 จะเป็นขาที่ใช้ตรวจสอบว่าวงจรสังเคราะห์ความถี่สามารถผลิตความถี่ ได้ตรงตามที่เราต้องการหรือไม่ โดยถ้าสัญญาณที่ขานี้เป็นสัญญาณระดับสูงก็แสดงว่า f_R และ f_V มีเฟสและความถี่ตรงกันแล้ว นั่นคือวงจรนี้สามารถผลิตความถี่ที่เราต้องการได้อย่างถูกต้องและเที่ยงตรงแล้ว



รูปที่ 3.10 การโปรแกรมตัวหารความถี่

นำวงจรลูปฟิลเตอร์ไปต่อกับไอซี ซึ่งใช้ในส่วนของวงจรสังเคราะห์ความถี่135.7 เมกกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11.การเซตขาต่างๆของไอซีเบอร์ MC 145152-2 เมื่อสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 วงจรลูปฟิลเตอร์

ใช้ออปแอมป์เบอร์ 358 ซึ่งวงจรนี้จะนำสัญญาณ ϕ_V และ ϕ_R จากวงจรเปรียบเทียบเฟสต่อเข้ามาเป็นอินพุต โดย ϕ_V ต่อเข้าขา 3 และ ϕ_R ต่อเข้าขา 2 เพื่อทำการเปรียบเทียบเฟสและแปลงค่าความแตกต่างออกมาเป็นไฟตรงเพื่อต่อไปชดเชยให้แก่วงจรวีซีโอเพื่อให้วงจรวีซีโอสามารถผลิตความถี่ได้ตรงที่เราต้องการ และวงจรนี้ยังทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter : LPF) อีกด้วย

การคำนวณค่าต่างๆที่ต่อในวงจรสามารถคำนวณได้จาก

$$f_0 = 135.7MHz \quad (Local\ Oscillator\ Frequency)$$

$$f_s = 10kHz \quad (Channel\ Spacing)$$

$$f_b = 0.01 f_s \quad (Loop\ Bandwidth)$$

$$f_{ref} = 20 f_b \quad (Filter\ Cutff\ Frequency)$$

$$\delta = 0.8 \quad (Loop\ Damping\ Factor)$$

$$V_{DD} = 5V \quad (PLL\ Supply\ Voltage)$$

$$C_1 = 0.1\mu F \quad (Active\ Integrator\ Component)$$

$$N_t = \frac{f_o}{f_s} \quad (Total\ Deviation\ Radio\ in\ Feedback\ Loop$$

$$\omega_n = \frac{2\pi f_b}{\sqrt{2\delta^2 + 1 + \sqrt{\left(2\delta^2 + 1\right)^2 + 1}}} \quad (Natural\ Frequency)$$

$$K_\Phi = \frac{V_{DD}}{2\pi} \quad (Phase\ Detect\ Gain)$$

$$K_{vco} = \frac{2\pi\Delta f_{vco}}{\Delta V_{vco}}$$

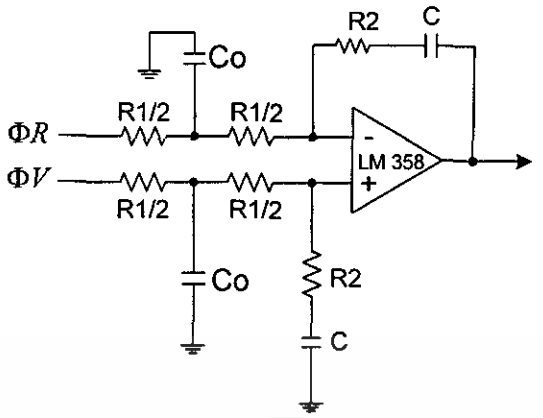
$$R_1 = \frac{K_\Phi K_{vco}}{C_1 \omega_n^2 N_t}$$

$$R_2 = \frac{2\varepsilon}{C_1 \omega_n}$$

$$C_o = \frac{4}{2R_1 f_{ref}}$$

โดยต่อวงจรลูปฟิลเตอร์ตามรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12วงจรลูปฟิลเตอร์

สามารถคำนวณค่าต่างๆตามลูปฟิลเตอร์ได้ดังนี้

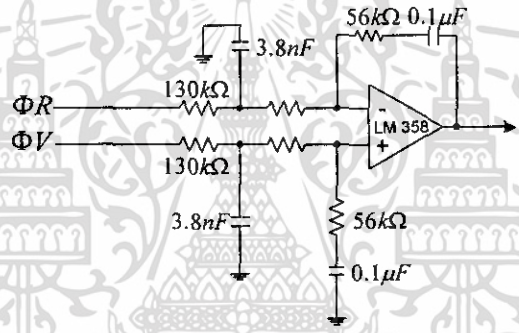
$$\Delta f_{vco} = 13MHz$$
$$\Delta V_{vco} = 2.2V$$
$$f_0 = 135.7MHz$$
$$f_s = 10kHz$$
$$f_b = 0.01 f_s$$
$$= 100Hz$$
$$f_{rc} = 20 f_b$$
$$= 2000Hz$$
$$\delta = 0.8$$
$$V_{DD} = 5V$$
$$C_1 = 0.1\mu F$$
$$K_{vco} = 37.1279 \times 10^6$$
$$\omega_n = 287.6976$$
$$N_t = \frac{135.7 \times 10^6}{10 \times 10^3}$$
$$= 135700$$

สำหรับวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ ได้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{K_\Phi K_{vco}}{C_1 \omega_n^2 N_t}$$
$$= 259.606k\Omega$$
$$R_2 = \frac{2\delta}{C_1 \omega_n}$$
$$= 55.614k\Omega$$
$$C_o = \frac{4}{2R_1 f_{ref}}$$
$$= 3.852nF$$
$$R_{1/2} = 129.803k\Omega$$

วงจรลูปฟิลเตอร์ที่ต่อตามค่าที่คำนวณแล้วแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรลูปฟิลเตอร์ของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป135.7 เมกกะเฮิรตซ์

สำหรับวงจรสังเคราะห์ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์ ได้ค่า

$$\Delta f_{vco} = 14MHz$$
$$\Delta V_{vco} = 1.4V$$
$$f_0 = 136.7MHz$$
$$f_s = 10kHz$$
$$K_{vco} = 10 \times 10^6$$
$$\omega_n = 287.6976$$
$$N_t = \frac{136.7 \times 10^6}{10 \times 10^3}$$
$$= 136700$$
$$R_1 = 70.3314k\Omega$$
$$R_2 = 55.614k\Omega$$
$$C_o = 14.218nF$$
$$R_{1/2} = 35.1657k\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรสังเคราะห์ความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์ ได้ค่า

$$\Delta f_{vco} = 13MHz$$
$$\Delta V_{vco} = 2.5V$$
$$f_0 = 125MHz$$
$$f_s = 10kHz$$
$$K_{vco} = 32.67 \times 10^6$$
$$\omega_n = 287.6976$$
$$N_t = \frac{125 \times 10^6}{10 \times 10^3}$$
$$= 12500$$
$$R_1 = 251.2991k\Omega$$
$$R_2 = 55.614k\Omega$$
$$C_o = 3.979322nF$$
$$R_{1/2} = 125.6496k\Omega$$

สำหรับวงจรสังเคราะห์ความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์ ได้ค่า

$$\Delta f_{vco} = 8MHz$$
$$\Delta V_{vco} = 2V$$
$$f_0 = 126MHz$$
$$f_s = 10kHz$$
$$K_{vco} = 25.13274 \times 10^6$$
$$\omega_n = 287.6976$$
$$N_t = \frac{126 \times 10^6}{10 \times 10^3}$$
$$= 12600$$
$$R_1 = 30.5216k\Omega$$
$$R_2 = 55.614k\Omega$$
$$C_o = 32.76368nF$$
$$R_{1/2} = 15.2608k\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 วงจรเอฟเอ็มดีเทคเตอร์

วงจรเอฟเอ็มดีเทคเตอร์ในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ 13135 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้

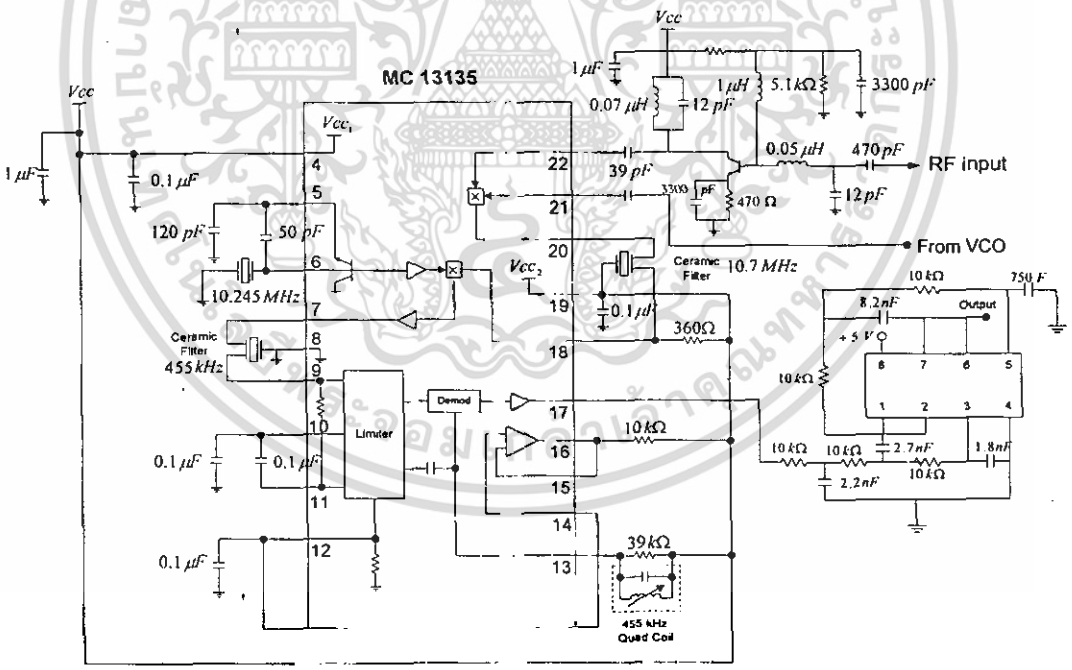
-วงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ซึ่งจะทำหน้าที่ย้ายความถี่ของสัญญาณไปไว้ในช่วงที่ความถี่กลาง ซึ่งจะทำการย้ายความถี่ 2 ต่อ (Double conversion) โดยครั้งแรกย้ายความถี่ไปที่ 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ ก่อนแล้วจึงย้ายความถี่ของสัญญาณอีกครั้งหนึ่งไปที่ 455 เฮิรตซ์

- เซรามิคฟิลเตอร์ (Ceramic filter) ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน 10.7 เมกกะเฮิรตซ์เพื่อให้ได้ความถี่กลาง10.7 เมกกะเฮิรตซ์ ออกมา

-เซรามิคฟิลเตอร์ 455 กิโลเฮิรตซ์ ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองช่วงความถี่ผ่าน 455 กิโลเฮิรตซ์เพื่อให้ได้ความถี่กลาง 455 กิโลเฮิรตซ์ ออกมาที่จะส่งเข้าไปที่วงจรขยายลิมิเตอร์ในไอซี (13135) อีกครั้ง

-วงจรลิมิเตอร์ (Limiter) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ได้จากเซรามิคฟิลเตอร์ให้แรงขึ้นและให้ได้ความถี่ขนาด 455 กิโลเฮิรตซ์ จริงๆ โดยการขลิบสัญญาณที่เกินออกเพื่อให้เอาต์พุตมีระดับสัญญาณที่สม่ำเสมอกันเพื่อลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณก่อนส่งไปยังวงจรดีเทคเตอร์ต่อไป

-วงจรดีเทคเตอร์จะทำการดีเทคสัญญาณที่รับมาจากวงจรลิมิเตอร์ ให้เป็นสัญญาณข่าวสารดั้งเดิมที่ทำการส่งมา ซึ่งลักษณะวงจร ใช้งานจะเป็นดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงแผนผังของไอซีเบอร์ 13135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การออกแบบวงจร BUTTERWORTH LOWPASS FILTER

โดยต้องการให้

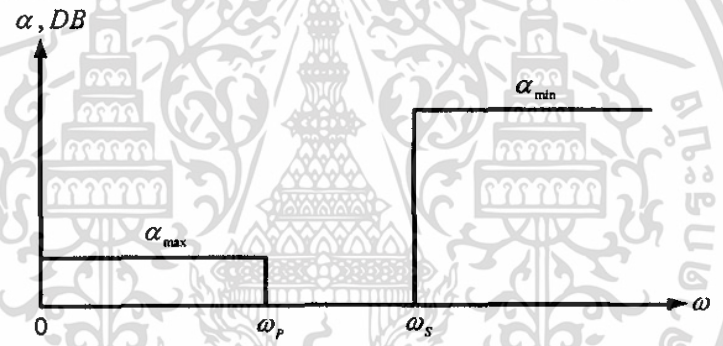
$$\alpha_{max} = 0.5\,dB$$

$$\omega_P = 3200\,{}^{rad}/_{s}$$

$$\alpha_{min} = 20\,dB$$

$$\omega_S = 62500\,{}^{rad}/_{s}$$

$$n = \frac{\log\left[\left(10^{\alpha_{min}/10}-1\right)/\left(10^{\alpha_{max}/10}-1\right)\right]}{2\log\left[\omega_S/\omega_P\right]}$$



$$n = 5$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_P}{\left(10^{\alpha_{max}/10}-1\right)^{1/2n}}$$

$$= 39442.03372\,{}^{rad}/_{s}$$

จะสามารถหาค่า Q ได้จาก Pole Location

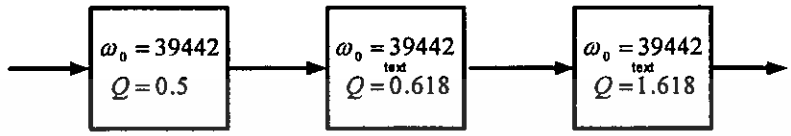
$$\psi = {}^{180}/_{n} \qquad \text{เมื่อ n เป็นเลขคี่}$$

$$= 0, \pm 36^{\circ}, \pm 72^{\circ}$$

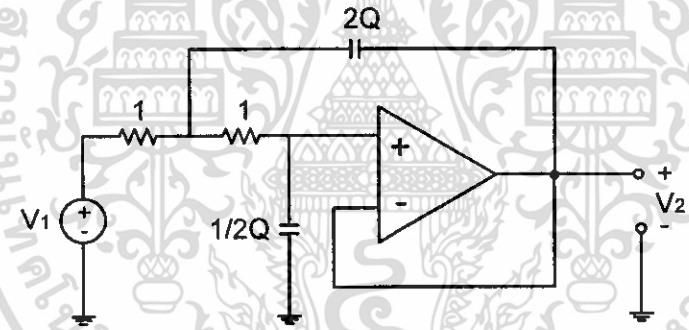
$$Q = \frac{1}{2\cos\psi}$$

$$= 0.5, 0.618, 1.618$$

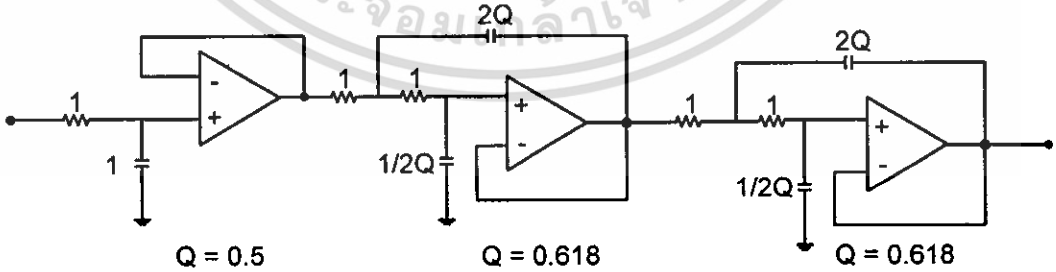
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นำวงจร Sallen และ Key มาใช้โดยกำหนด $R_1 = R_2$ และ $\omega_0 = 1$ จะได้ $C_1 = 2Q$ และ $C_2 = 1/2Q$



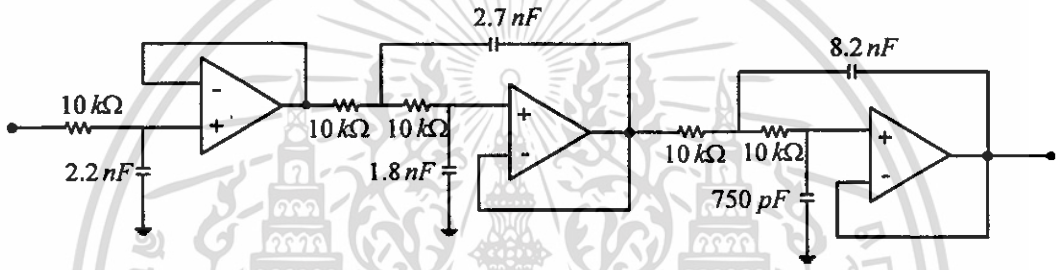
เมื่อรวมทั้ง 3 stages



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

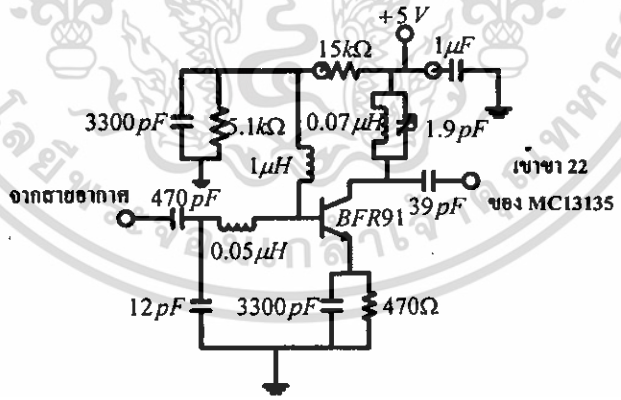
		Values of C_{ncw}	
Cold	Stage 1 $Q_0 = 0.5$	Stage 2 $Q_0 = 0.618$	Stage 3 $Q_0 = 1.618$
1	2.535 nF	-	-
2Q	-	3.1337 nF	8.2033 nF
1/2Q	-	2.0508 nF	0.7833 nF

สามารถเขียนรูปวงจรใหม่โดยประมาณค่า C ได้เป็นดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจร Low pass filter

3.8 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์



รูปที่ 3.16 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์

จากสูตร $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

ต้องการความถี่ $f = 135.7MHz$

เลือกค่า L $L = 0.07\mu H$

ได้ค่า C $C = 1.96pF$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การออกแบบระบบเครื่องสั่งอาหาร

ในโครงงานนี้จะใช้คอมพิวเตอร์มาทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์ โดยมีเครื่องสั่งอาหารเป็นตัวลูกข่ายใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 มาควบคุมการทำงาน ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นหากปล่อยให้เครื่องสั่งอาหารทุกเครื่องทำงานได้ในเวลาเดียวกัน จะเกิดการรบกวนกันและกันเนื่องจากเครื่องสั่งอาหารทุกเครื่องใช้ความถี่เดียวกันในการทำงาน ดังนั้นในโครงงานนี้จึงได้ให้คอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์มาเป็นตัวจัดการกำหนดลำดับการทำงานของเครื่องสั่งอาหารทุกเครื่องไม่ให้ทำงานในเวลาเดียงกัน มีวิธีการตามขั้นตอนดังนี้

1.เครื่องแม่ส่งสัญญาณที่มีรหัสประจำตัวของตัวลูกออกไป

2.ตัวลูกทุกตัวได้รับข้อมูลรหัสประจำตัวลูกที่ตัวแม่ส่งมาโดยจะเปรียบเทียบว่าเป็นรหัสของตนหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ก็ไม่ตอบสนองใดๆ

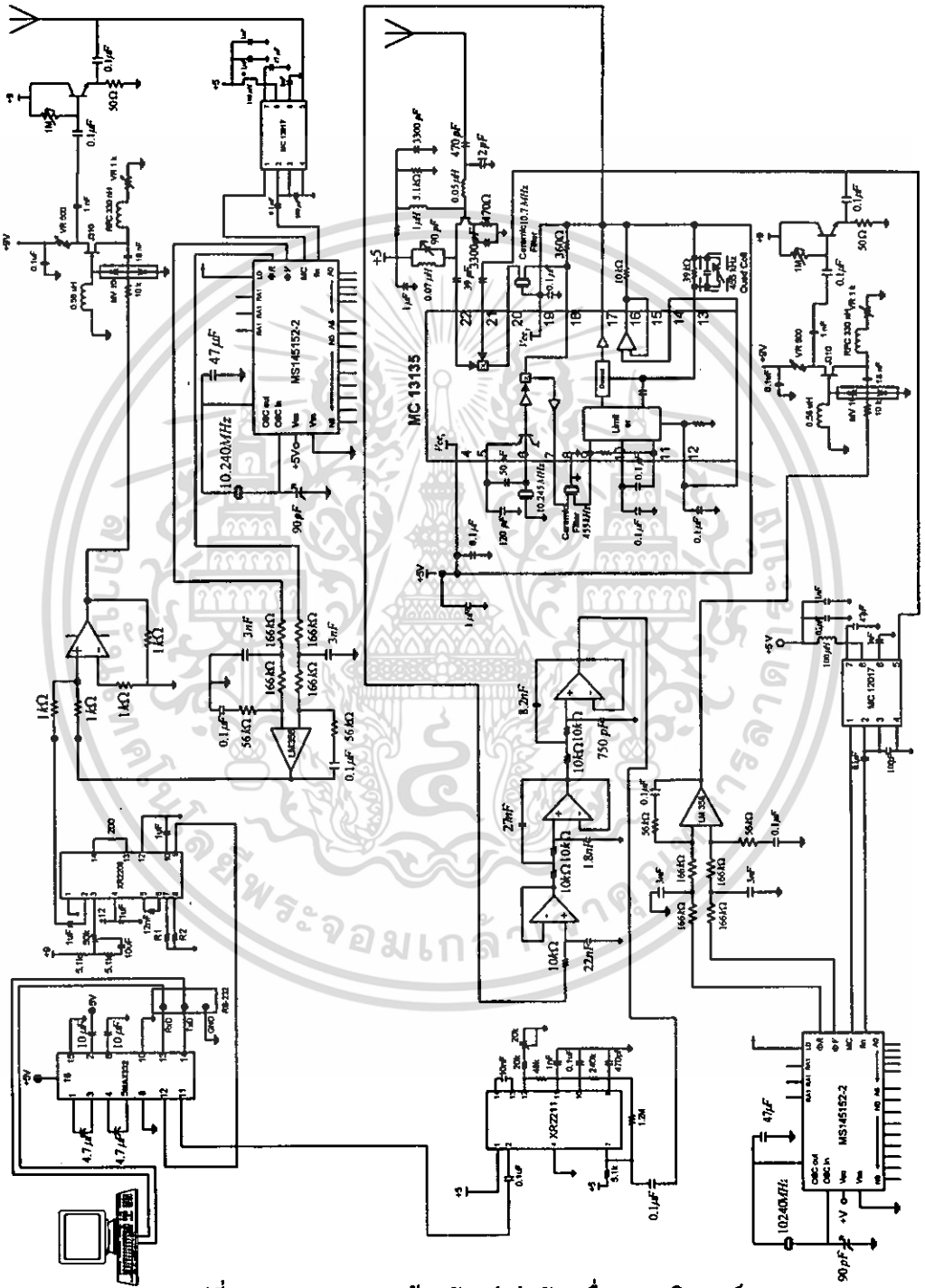
3.หากเป็นข้อมูลรหัสของตน จะทำการตรวจสอบว่ามีข้อมูลรายการอาหารที่ต้องการส่งหรือไม่ หากมีข้อมูลรายการอาหารที่ต้องการส่ง ก็จะส่งรหัสประจำตัวของตัวเองตามด้วยข้อมูลนั้นออกไปให้ตัวแม่ แต่ถ้าหากว่าไม่มีข้อมูลก็จะไม่ตอบสนองใดๆ

4.ตัวแม่รับการตอบสนองกลับกลับมาจากตัวลูกที่ตัวแม่เลือกไว้โดยการจับเวลา หากพบว่าไม่มีข้อมูลอะไรส่งมาถือเป็นการสิ้นสุดการติดต่อกับตัวลูกตัวนั้น และให้โอกาสตัวลูกตัวต่อไปในการส่งข้อมูลบ้าง แต่หากส่งเป็นข้อมูลรายการอาหาร ตัวแม่จะทำการเปรียบเทียบข้อมูลนั้นกับฐานข้อมูลและทำการแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ต่อไปจากนั้นก็จะส่งสัญญาณกลับไปที่ตัวลูกเพื่อทำการแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ต่อไปจากนั้นก็จะทำการส่งสัญญาณกับไปที่ตัวลูกเพื่อทำการยืนยันว่าตัวแม่นั้นได้รับข้อมูลที่ตัวลูกส่งมาเรียบร้อยแล้วเป็นอันจบการติดต่อกับตัวลูกตัวนี้ และให้โอกาสตัวลูกตัวต่อไปในการส่งข้อมูล

5.หากตัวลูกได้รับสัญญาณการยืนยันจากตัวแม่ ก็จะทำการแสดงข้อความยืนยันออกทางหน้าจอแอลซีดีให้ผู้สั่งอาหารได้ทราบต่อไป

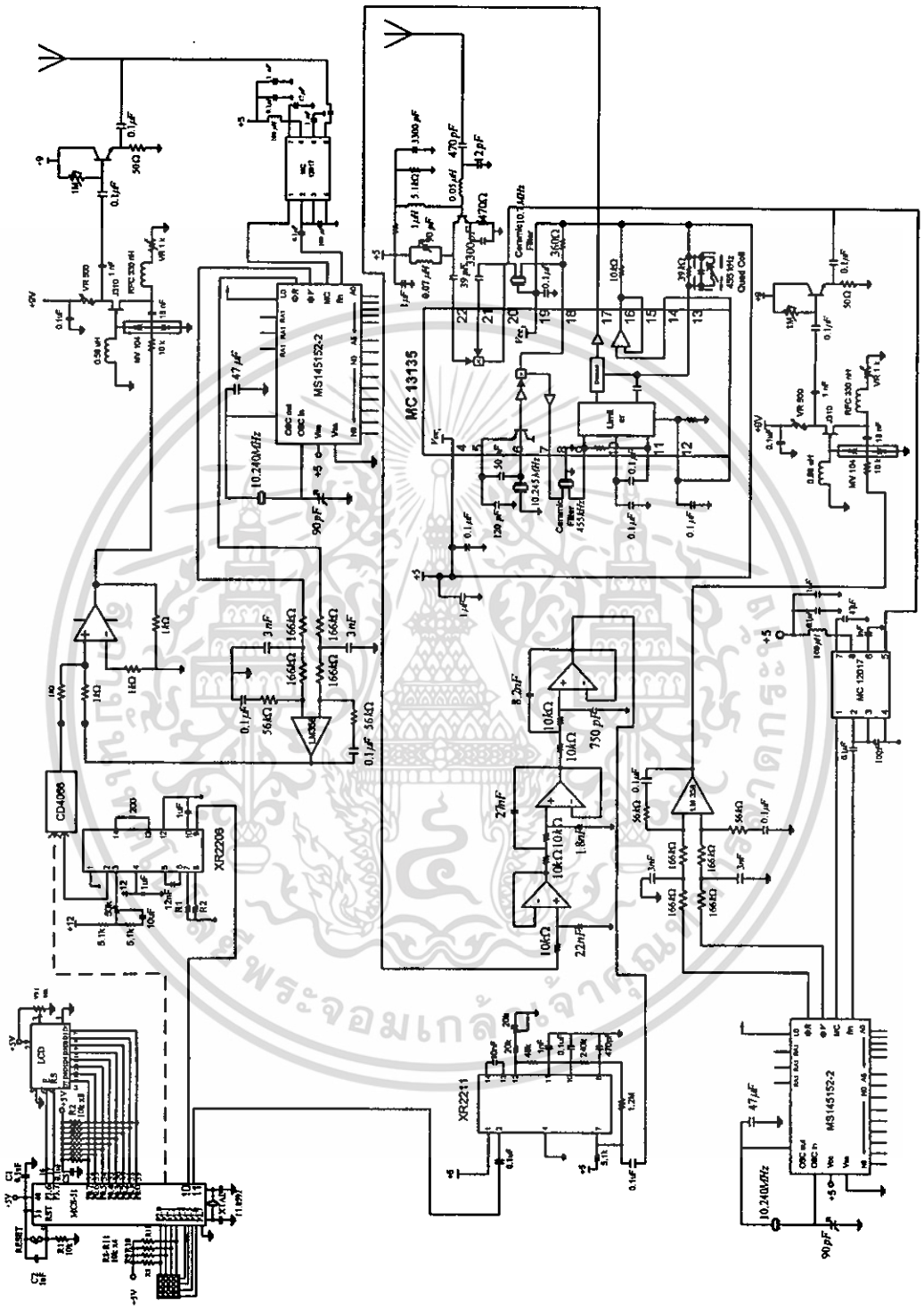
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 รูปวงจรรวม



รูปที่ 3.17 วงจรรวมทางด้านตัวแม่(ต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



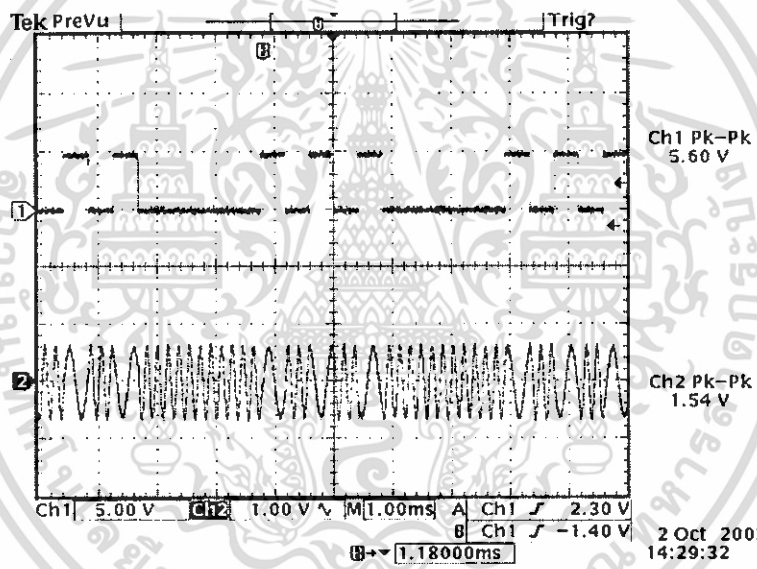
รูปที่ 3.18 วงจรรวมทางด้านตัวลูก(ต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 วงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์

ได้ทำการทดลองต่อวงจร FSK Modulator ดังรูปที่ 3.4 เพื่อทำการแปลงจากสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอก โดยได้ทำการส่งสัญญาณตัวอักษร "A" จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงสัญญาณดังรูปที่ 4.1 Ch 1 แล้วนำมาป้อนเป็นสัญญาณอินพุตของวงจร FSK Modulator จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาเป็นสัญญาณอนาลอกมีความถี่ตามที่ออกแบบไว้คือ ที่ลอจิก "0" เป็นสัญญาณที่มีความถี่ 2.4 kHz และที่ ลอจิก "1" เป็นสัญญาณที่มีความถี่ 5.4 kHz แสดงดังรูปที่ 4.1 Ch 2



รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์

Ch1 Input ที่เข้าวงจร FSK Modulator โดยส่งลอจิกตัวอักษร "A"

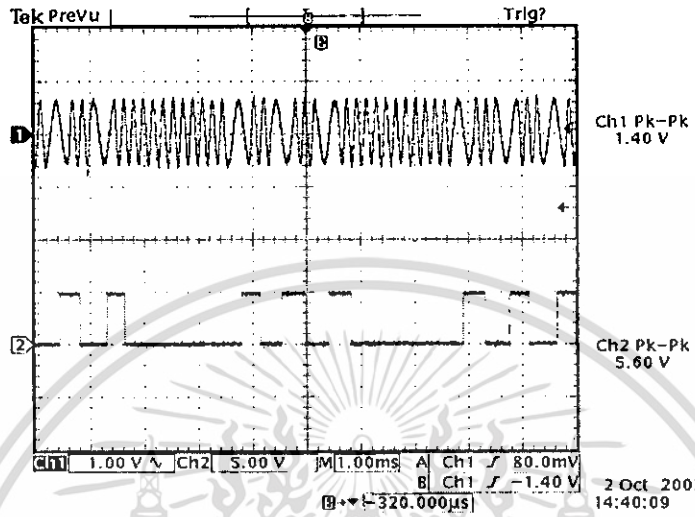
Ch2 Output ที่ออกวงจร FSK Modulator โดยส่งลอจิกตัวอักษร "A"

และได้ทำการต่อวงจร FSK Demodulater ดังรูปที่ 3.6 เพื่อแปลงสัญญาณกลับคือจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยนำสัญญาณเอาต์พุตที่ออกวงจร FSK Modulator ป้อนเป็นอินพุตของวงจร FSK Demodulater ดังรูปที่ 4.2 Ch 1 จะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิตอล ดังรูปที่ 4.2 Ch 2

แล้วแสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณตัวอักษร "A" ที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์(อินพุตของวงจร FSK Modulator)กับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก FSK Demodulater ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าทั้งสองสัญญาณมีลักษณะเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

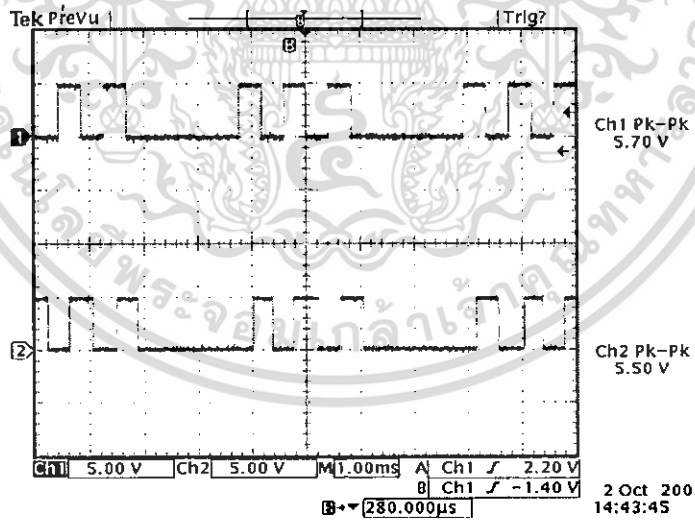
4.2 วงจรเอฟเอสเคดีมอดูเลเตอร์



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์

Ch1 Input ที่เข้าวงจร FSK Demodulatorโดยส่งลอจิกตัวอักษร "A"

Ch2 Output ที่ออกวงจร FSK Demodulatorโดยส่งลอจิกตัวอักษร "A"



รูปที่4.3 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่เข้า FSK Modulation

และ สัญญาณที่เอออกจาก FSK Demodulation

Ch1 Input ที่เข้าวงจร FSK Modulatorโดยส่งลอจิกตัวอักษร "A"

Ch2 Output ที่ออกวงจร FSK Demodulatorโดยส่งลอจิกตัวอักษร "A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกลูป

ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้

1.วงจรออสซิลเล่เตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน(VCO)

2.วงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส

3.วงจรเปรียบเทียบเฟส

4.วงจรลูปฟิลเตอร์

4.3.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์

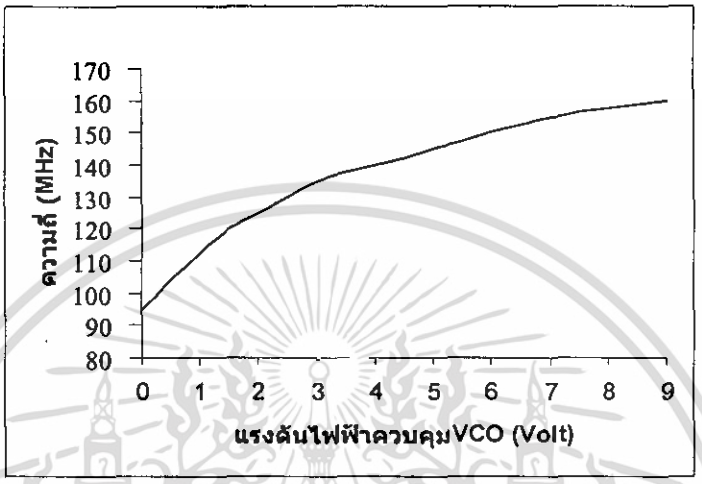
Vcontrol	f(MHz)	Power(dBm)
0	95	-54
1.0	112.5	-51
1.5	120	-50.8
2.0	125	-49.2
2.5	130	-49.4
3.0	135	-50
3.5	137.5	-49
4.0	140	-49.2
4.5	142.5	-49.8
5.0	145	-48
5.5	147.5	-49
6.0	150	-49.2
6.5	152.5	-48.8
7.0	155	-47.8
8.0	157.5	-49
9.0	160	-49.4

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และค่าความต่างศักย์ของวีซีโอความถี่ 135.7 MHz

ทำการทดลองวงจรวีซีโอโดยป้อนแรงดันไฟตรงควบคุมขนาดตั้งแต่ 0-9 โวลต์ เข้าที่วาริแคปวัดผลการทดลองได้ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าวงจรสามารถผลิตสัญญาณความถี่เปลี่ยนไปตามขนาดของแรงดันไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงควบคุมผลการทดลองสามารถนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตรงควบคุมกับความถี่ได้กราฟดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์

ค่าความชันของกราฟจะนำไปหาคอนเวอร์ชั่นเกนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบวงจรลูปฟิลเตอร์ได้ดังนี้

$$K_{vco} = 2\pi \Delta f / \Delta V$$
$$= 37.1279 \times 10^{6} \text{ เรเดียน/โวลต์}$$

จากนั้นนำเอาต์พุตของวงจรวีซีโอ ต่อเข้ากับวงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองสองโมดูลัส โดยวงจรพรีสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัสจะหารความถี่ที่ได้จากวงจรวีซีโอด้วยตัวหาร 64 ได้ค่าเอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ดังนี้

$$f_{out} = \frac{f_{in}}{n}$$

โดย f_{in} คือ ความถี่ที่ได้รับจากวงจรวีซีโอ

f_{out} คือ ความถี่ที่ได้รับจากวงจรพรีสเกลเลอร์

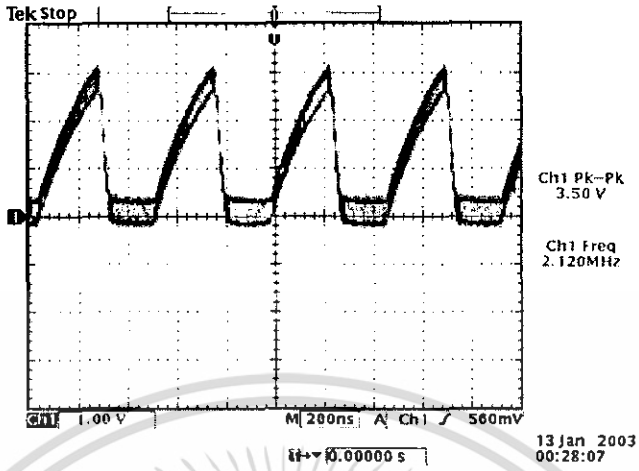
n คือ ตัวหาร , n = 64 เมื่อ MC = 0

n = 65 เมื่อ MC = 1

f_{out} = 135.7 MHz / 64

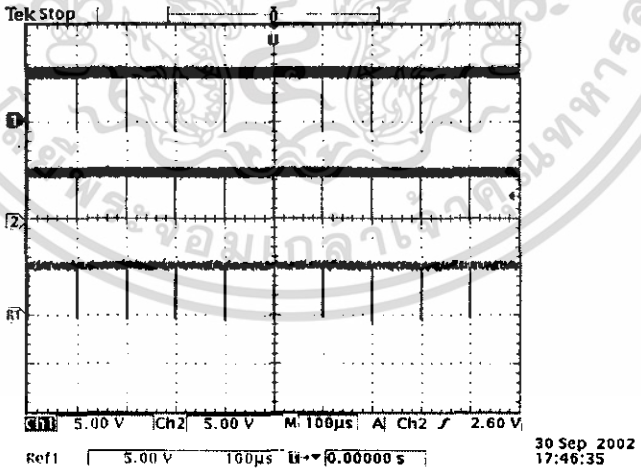
= 2.120313 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ ทางด้านส่ง

จากนั้นจะนำสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรพรีเกลเลอร์ต่อเข้ากับวงจรเฟสดีเทคเตอร์และวงจรลูปฟิลเตอร์ที่โปรแกรมค่าเคาน์เตอร์ N และเคาน์เตอร์ A ไว้แล้วให้ล็อกที่ความถี่ 135.7เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบว่าวงจรสังเคราะห์ความถี่นี้อยู่ในสภาวะล็อกหรือไม่โดยถ้าระบบอยู่ในสภาวะล็อกเฟสของสัญญาณอ้างอิง และเฟสของสัญญาณวีซีโอจะต้องเท่ากัน โดยจะดูได้จากขาสัญญาณ ϕ_V และ ϕ_R จะต้องอยู่ในสภาวะ high จะมีเพียงช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้นที่สัญญาณอยู่ในสภาวะ low และสัญญาณที่ขา LD(Lock Detect) คือขา 28 ของไอซีจะต้องอยู่ในสภาวะ high ด้วยดังรูปที่ 4.6



รูปที่4.6 แสดงเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD

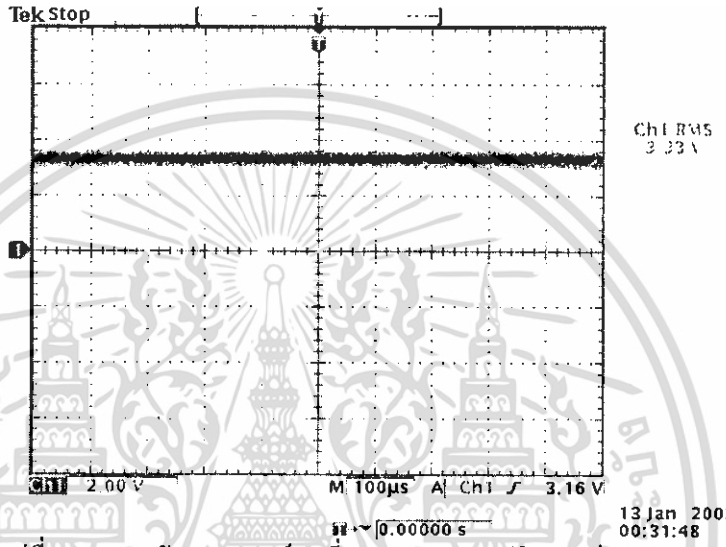
Ch1 คือ สัญญาณที่ขา LD

Ch2 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_V ที่ขา 7

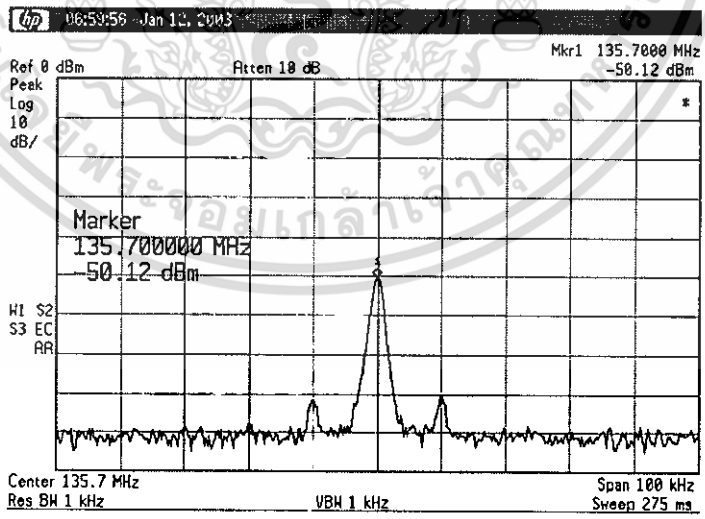
Ref1 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_R ที่ขา 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผ่านวงจรลูปฟิลเตอร์เพื่อทำการกรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ออก เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟดีซี ซึ่งเป็นสัญญาณที่นำไปควบคุมวงจรวีซีโอ แสดงดังรูป ที่ 4.7 เพื่อสร้างสัญญาณที่มีความถี่ตามที่เราต้องการออกมาได้



รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจรลูปฟิลเตอร์



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

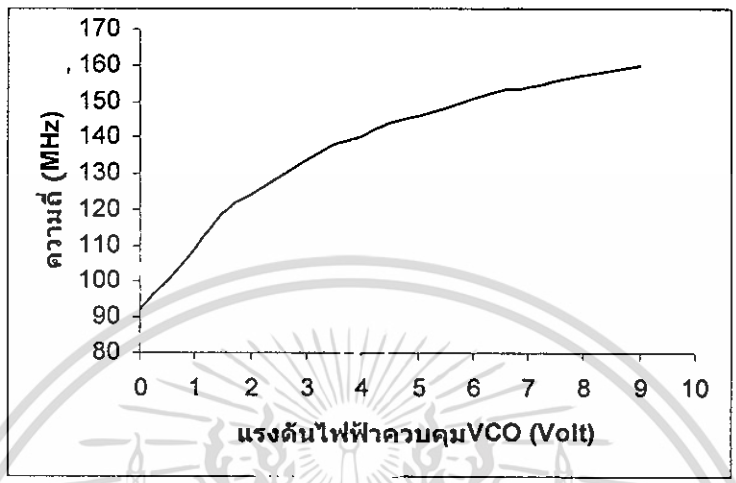
4.3.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆเหมือนวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ โดยมีผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอดังนี้

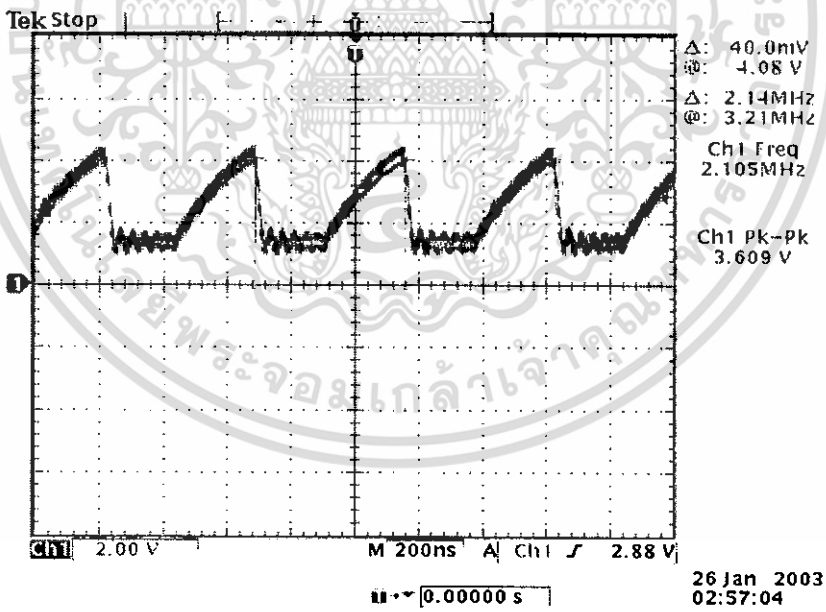
Vcontrol	f(MHz)	Power(dBm)
0	92	-55.4
1.0	109	-49
1.5	119	-55
2.0	124	-51.4
2.5	129	-51
3.0	134	-49.4
3.5	138	-49.4
4.0	140	-50.2
4.5	144	-49
5.0	146	-49.8
5.5	148	-48.6
6.0	151	-47.4
6.5	153	-48.2
7	154	-48.6
8	157	-47
9	160	-49

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่ 136.7 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

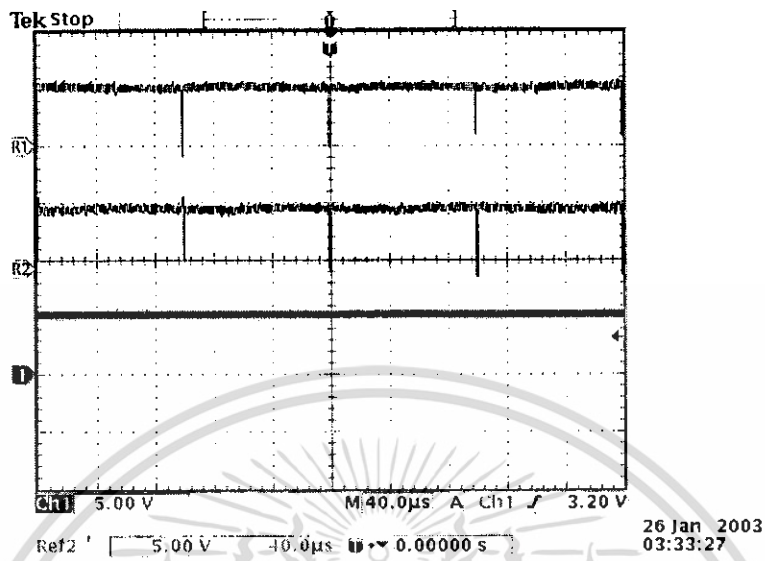


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ ทางด้านส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



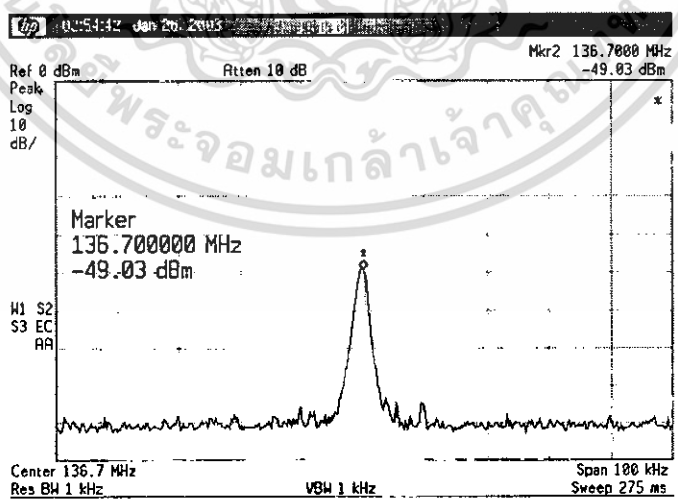
รูปที่ 4.11 แสดงเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD

Ref1 คือ สัญญาณที่ขา LD

Ref 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_V ที่ขา 7

Ch1 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_R ที่ขา 8

เมื่อผ่านวงจรลูปฟิลเตอร์เพื่อทำการกรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ออกเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟดีซี ซึ่งเป็นสัญญาณที่นำไปควบคุมวงจรวีซีโอ



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

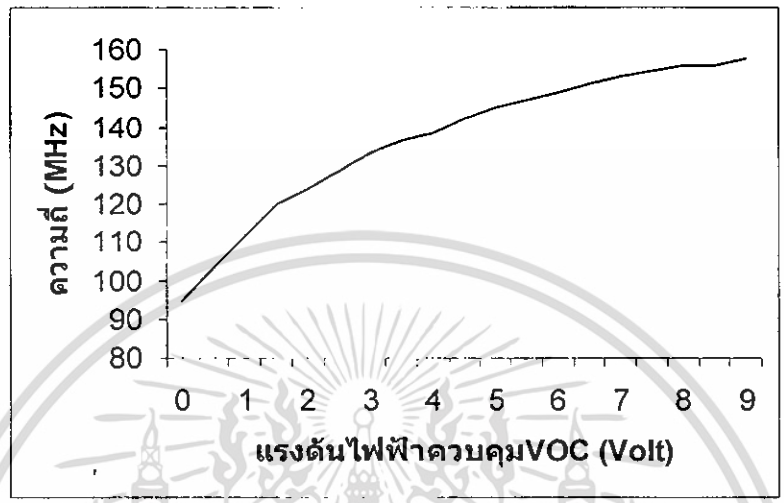
4.3.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องรับที่มีความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆเหมือนวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ โดยมีผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอดังนี้

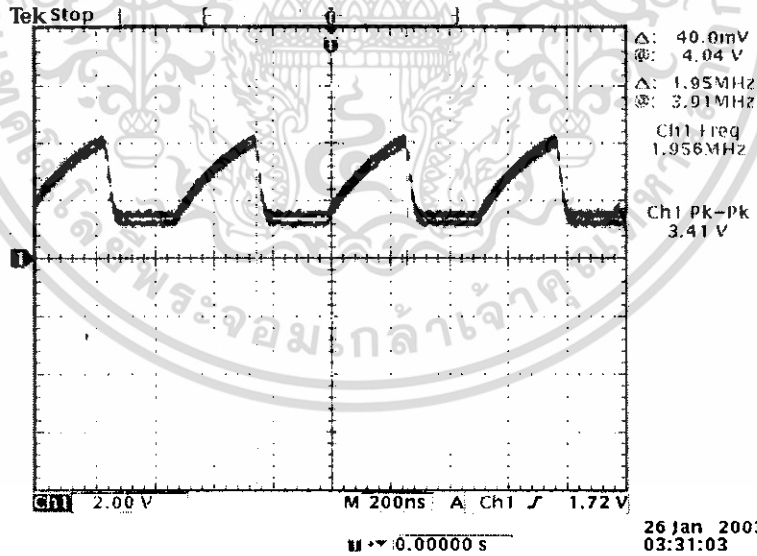
Vcontrol	f(MHz)	Power(dBm)
0	94.5	-59
0.5	103.1	-55
1.0	111.7	-53.2
1.5	120	-54
2.0	124	-52
2.5	128.5	-52
3.0	133	-51.6
3.5	136.5	-51.8
4.0	138.5	-52.2
4.5	142	-52
5.0	144.8	-52
5.5	147	-52
6.0	148.8	-52.2
6.5	150.9	-52.2
7.0	153	-52.2
7.5	154.3	-51.8
8.0	156	-51.6
8.5	157.5	-51.6
9.0	159	-51.8

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่ 125 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

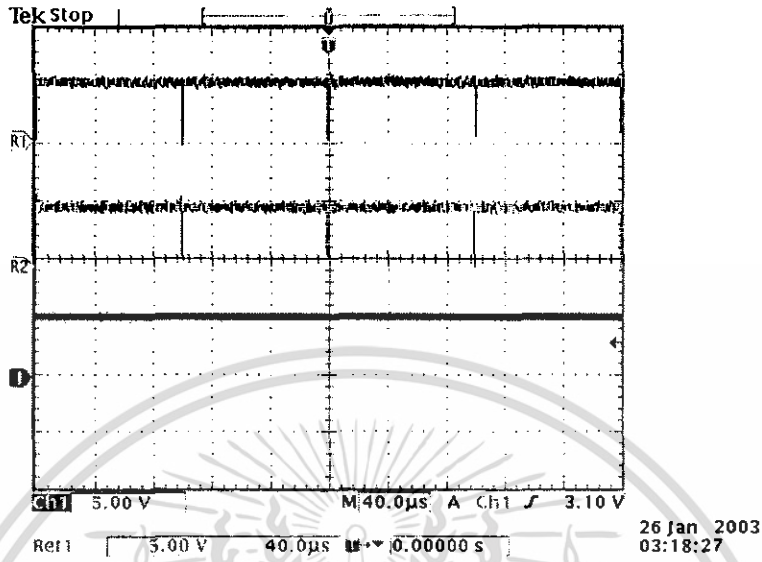


รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ 125 เมกกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ ทางด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



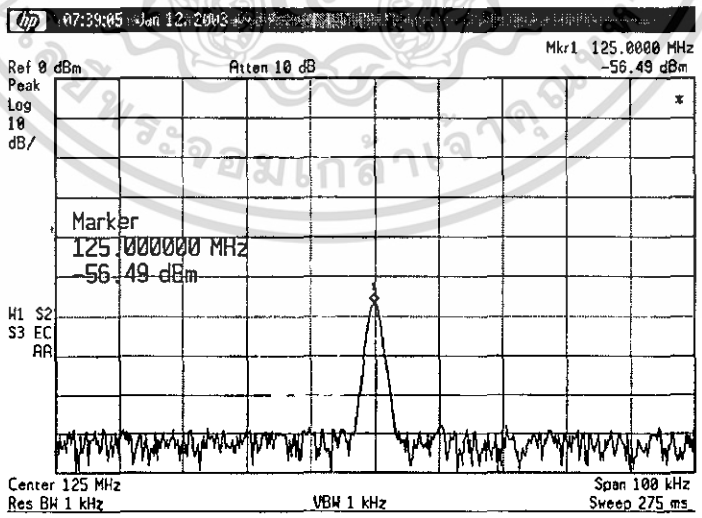
รูปที่ 4.15 แสดงเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD

Ref1 คือ สัญญาณที่ขา LD

Ref 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_V ที่ขา 7

Ch1 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_R ที่ขา 8

เมื่อผ่านวงจรลูปฟิลเตอร์เพื่อทำการกรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ออก เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟดีซี ซึ่งเป็นสัญญาณที่นำไปควบคุมวงจรวีซีโอ



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 125 เมกกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

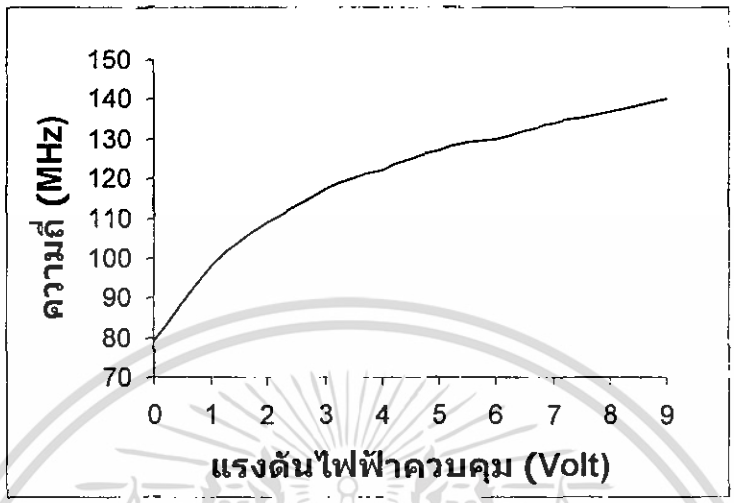
4.3.4 วงจรสังเคราะห์ความถี่ของเครื่องส่งที่มีความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆเหมือนวงจรสังเคราะห์ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ โดยมีผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอดังนี้

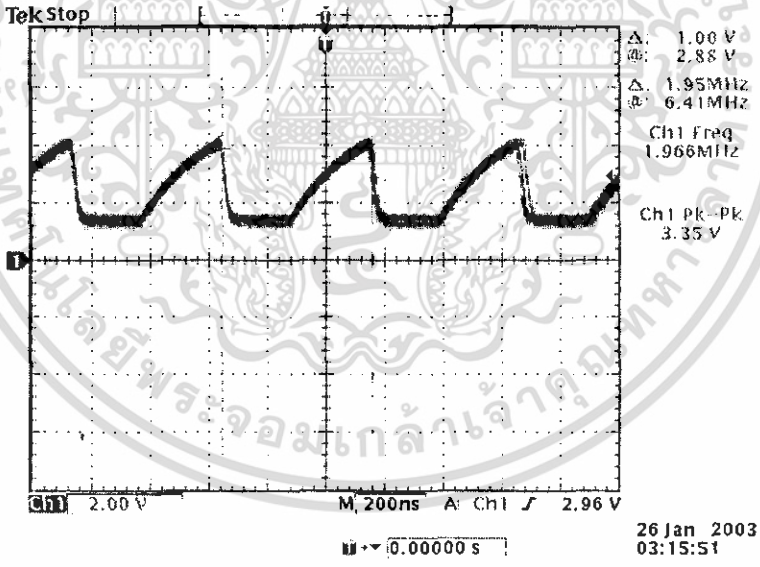
Vcontrol	f(MHz)	Power(dBm)
0	19	-59
1.0	97.8	-55.2
1.5	104	-54.2
2.0	109	-53.4
2.5	113	-52.6
3.0	117	-54.2
3.5	120	-52.2
4.0	122	-52.6
4.5	125	-51.8
5.0	127	-52.4
5.5	129	-53
6.0	130	-53.8
6.5	132	-51.4
7	134	-53.4
8	137	-52.6
9	140	-51

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการออสซิลเลทความถี่และเพาเวอร์ของวีซีโอความถี่126 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

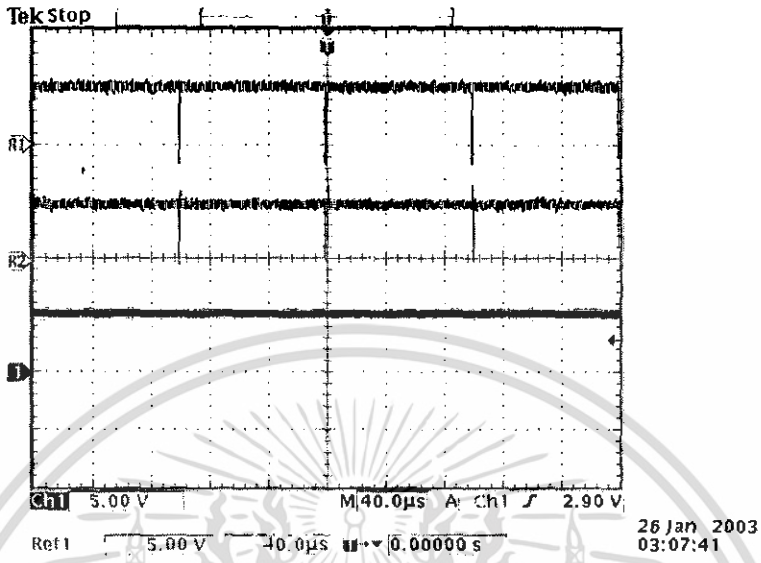


รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟตรงที่ควบคุมของวีซีโอ 126 เมกกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ ทางด้านรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



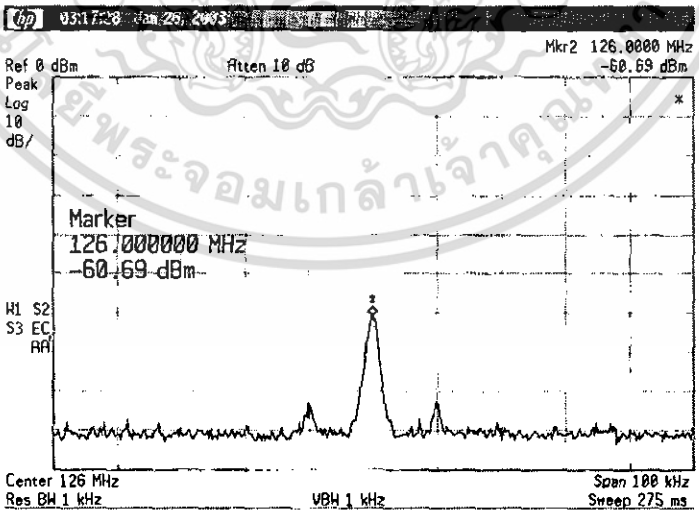
รูปที่4.19 แสดงเอาต์พุตของเฟสดีเทคเตอร์และสัญญาณที่ขา LD

Ref1 คือ สัญญาณทีขา LD

Ref 2 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_V ที่ขา 7

Ch1 คือ สัญญาณเอาต์พุต Φ_R ที่ขา 8

เมื่อผ่านวงจรลูปฟิลเตอร์เพื่อทำการกรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ออก เอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัญญาณไฟดีซี ซึ่งเป็นสัญญาณที่นำไปควบคุมวงจรวีซีโอ



รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ 126 เมกกะเฮิรตซ์

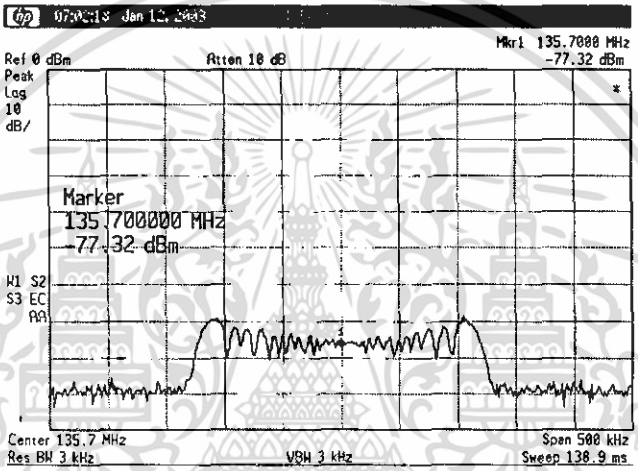
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การมอดูเลตทางความถี่

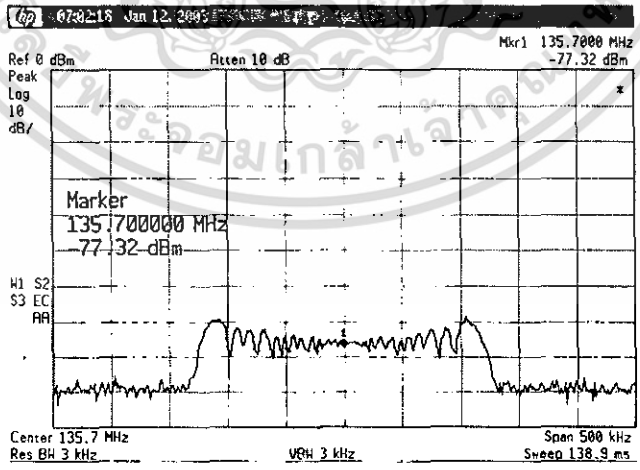
การศึกษาการมอดูเลตทางความถี่ในการส่งสัญญาณต่างๆจำเป็นต้องรู้ว่าสัญญาณนั้นมีอุปกรณ์อยู่ในช่วงความถี่เท่าไหร่ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงที่สำคัญคือ ค่าความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณข่าวสารกับสเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็ม

สังเกตค่าความถี่เบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นโดยทำการทดลองโดยป้อนสัญญาณไซน์ที่มีขนาดต่างกันแล้วทำการเปรียบเทียบผลของสเปกตรัมที่เกิด คือ สัญญาณไซน์ที่ ความถี่3kHz แอมปลิจูด50mV และสัญญาณไซน์ความถี่3kHz แอมปลิจูด 100 mV แสดงผลของสเปกตรัมได้ดังรูปที่ 4.21,4.22



รูปที่ 4.21 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด50mV



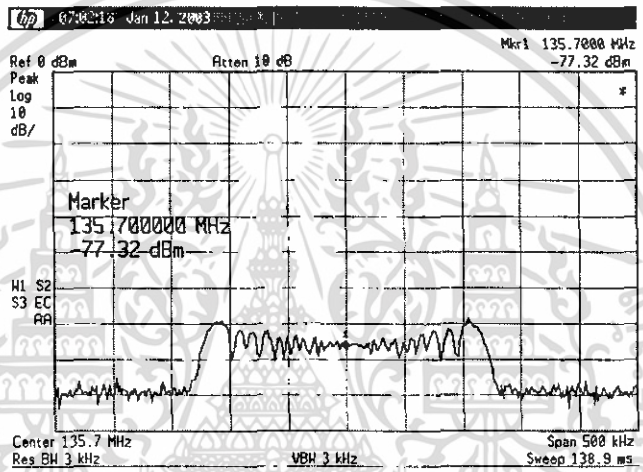
รูปที่ 4.22 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด100 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

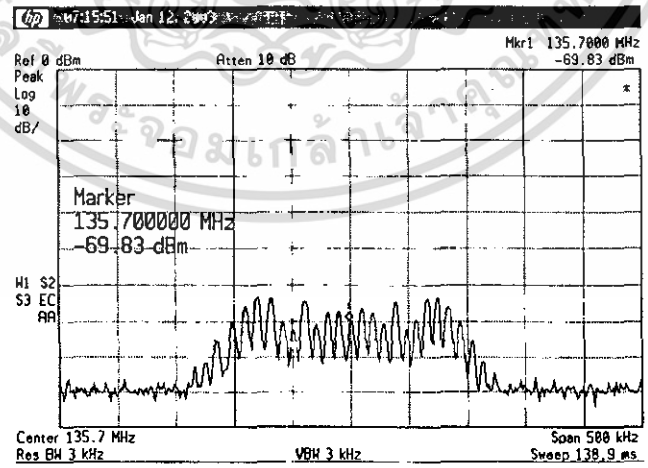
ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณที่นำมามอดูเลตไม่มีผลกับขนาดของแบนด์วิดท์ของวงจรมอดูเลชัน

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณข่าวสารกับสเปกตรัมของสัญญาณเอฟเอ็ม

เราจะทำทดลองโดยการป้อนสัญญาณไซน์ที่มีขนาดเท่ากันแต่มีความถี่ที่แตกต่างแล้วทำการสังเกตสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้ คือ สัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด 50 mV และ สัญญาณไซน์ความถี่ 10 kHz แอมปลิจูด50 mV ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.23,4.24



รูปที่ 4.23 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่3kHz แอมปลิจูด50mV

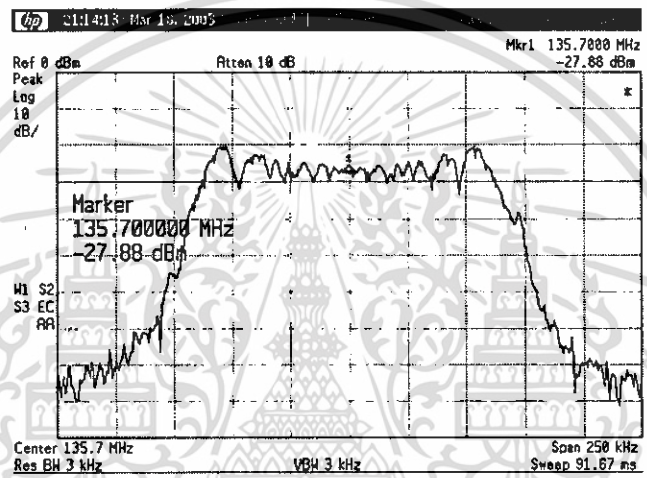


รูปที่ 4.24 แสดงผลสเปกตรัมของการสัญญาณFM
เมื่อข่าวสารเป็นสัญญาณไซน์ ความถี่10 kHz แอมปลิจูด50mV

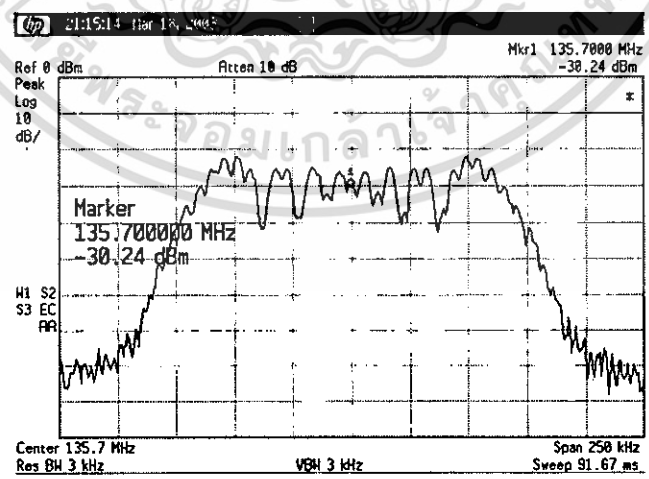
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสังเกตเห็นว่าเมื่อทดลองสร้างสัญญาณ FM ใช้ความถี่ของสัญญาณข่าวสารที่แตกต่างกันในการมอดูเลต แต่หันมาควบคุมขนาดของสัญญาณข่าวสารแทน จะได้สัญญาณ FM ตามสเปกตรัมรูปที่ 4.23 และ รูปที่ 4.24 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันอธิบายได้ว่าความถี่ของสัญญาณข่าวสารไม่มีผลต่อแบนด์วิทของสัญญาณ FM ส่วนที่เปลี่ยนแปลงคือ จำนวนแท่งสเปกตรัมในสัญญาณ FM ที่แปรผันตามความถี่ของสัญญาณข่าวสาร

4.4.3 ผลของสเปกตรัมจากการมอดูเลตที่ความถี่ 135.7 MHz



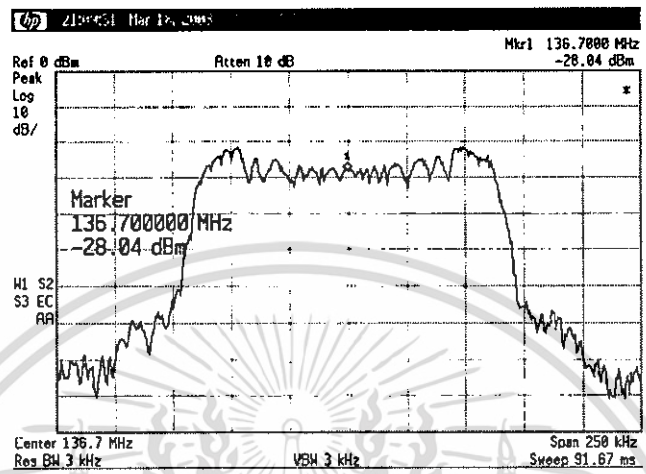
รูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 2.4 kHz



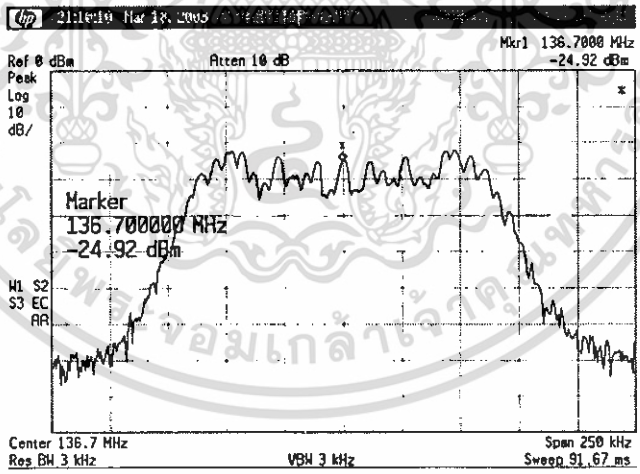
รูปที่ 4.26 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 135.7 เมกกะเฮิรตซ์ ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 5.4 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ผลของสเปกตรัมจากการมอดูเลตที่ความถี่ 136.7 MHz



รูปที่ 4.27 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์ ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 2.4 kHz

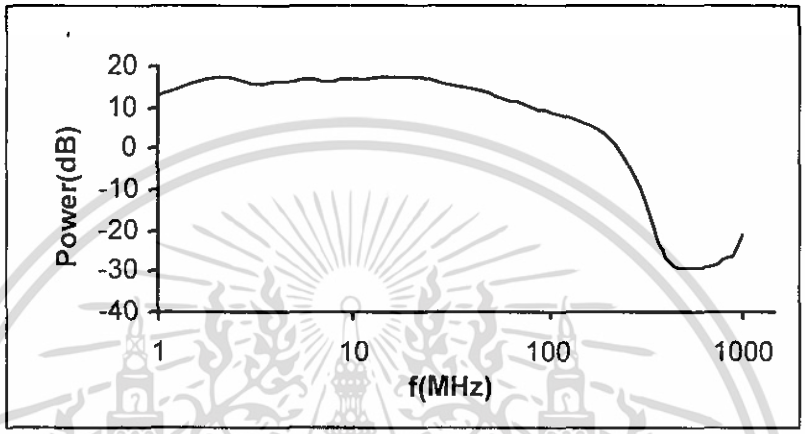


รูปที่ 4.28 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ FM ความถี่ 136.7 เมกกะเฮิรตซ์ ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณข่าวสาร 5.4 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองวงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)

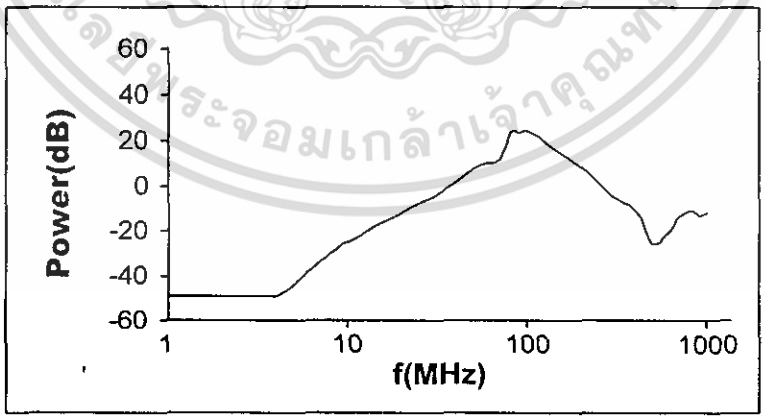
เป็นวงจรที่สร้างเพื่อเพิ่มอัตราการขยายสัญญาณ FM ที่ทำการส่งออกอากาศเพื่อให้ได้ระยะทางที่ไกล และเครื่องรับสามารถรับสัญญาณ FM ที่ส่งมาแล้วนำมาทำการดีมอดูเลตสัญญาณข่าวสารออกมาได้ถูกต้อง รูปที่ 4.29 แสดงกราฟคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังงาน

4.6 วงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์

เมื่อวัดคุณสมบัติของวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ แล้วนำมาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟคุณสมบัติของวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์

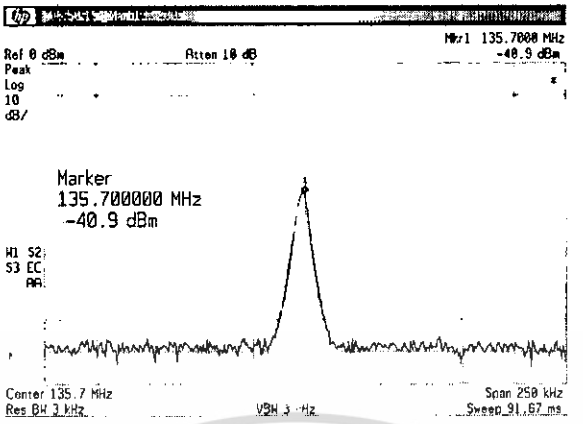
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f(MHz)	Power(dB)
1	-49
2	-49
3	-49
4	-49
5	-44
6	-38
7	-33
8	-30
9	-27
10	-25
20	-12
30	-5
40	1.3
50	7.2
60	10
70	11.8
80	23
90	23.4
100	24
200	8
300	-4
400	-10.5
500	-26
600	-22
700	-13
800	-11
900	-13
1000	-12

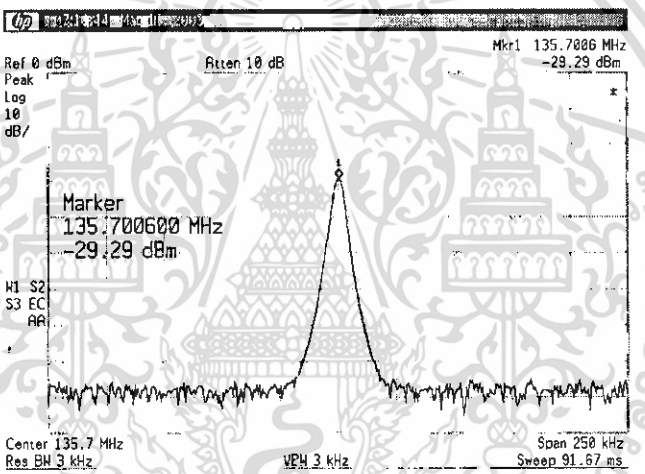
ตารางที่ 4.5 ตารางคุณสมบัติของวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์

เมื่อทำการทดลองรับสัญญาณทางเครื่องรับโดยยังไม่ผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ได้สเปกตรัมของสัญญาณที่ความถี่ 135.7 MHz มี power -40 dBm ดังรูปที่ 4.31และเมื่อทำการนำสัญญาณผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ได้สเปกตรัมของสัญญาณที่ความถี่ 135.7 MHz มี power -29 dBm ดังรูปที่ 4.32 ดังนั้นแสดงว่าวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์นี้ มีกำลังขยายเท่ากับ 11 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับ
ขณะยังไม่ผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ ที่ความถี่ 135.7 MHz -40 dBm

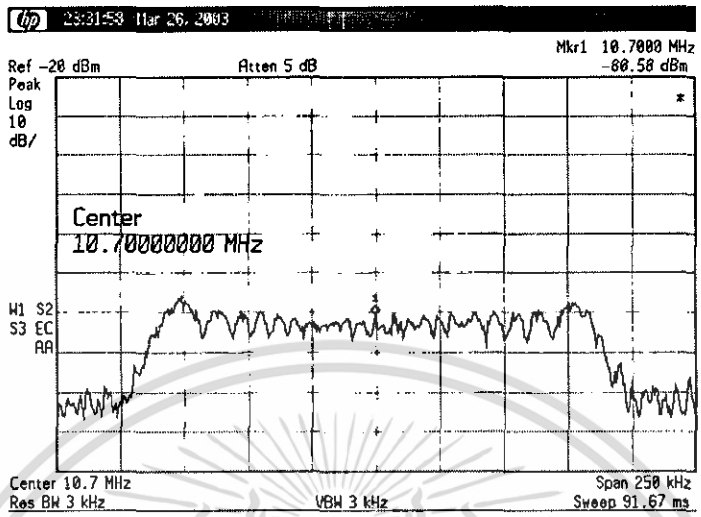


รูปที่ 4.32 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ทางเครื่องรับ
เมื่อผ่านวงจรพรีแอมปลิฟลายเออร์ ที่ความถี่ 135.7 MHz -29 dBm

4.7 วงจรเอฟเอ็มดีเทกเตอร์

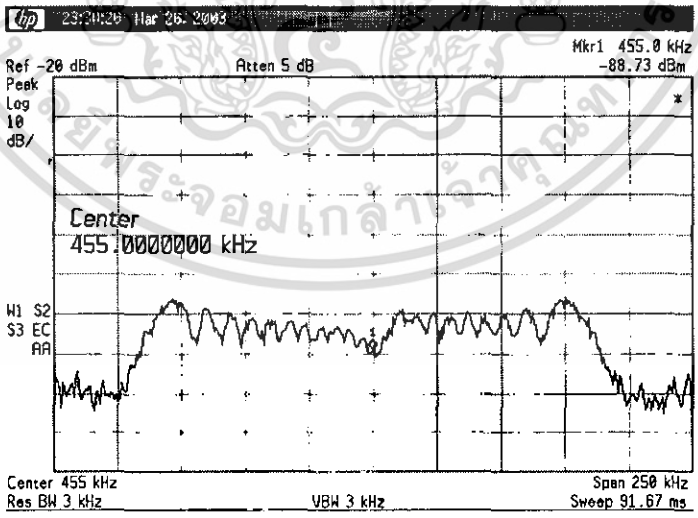
เลือกใช้ไอซีเบอร์ MC13135 เป็นตัวดีเทคสัญญาณเอฟเอ็มที่ส่งมา โดยที่มีหลักการทำงาน คือ ลดความถี่จากสัญญาณเอฟเอ็มที่รับมาได้เป็น 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ โดยใช้หลักการผสมสัญญาณ (mixer) ในที่นี้ความถี่ของสัญญาณเอฟเอ็ม คือ 135.7 ,136.7 เมกกะเฮิรตซ์ เพราะฉะนั้นสัญญาณที่นำมาผสมกับ135.7,136.7 เมกกะเฮิรตซ์ คือ ความถี่,125,126 เมกกะเฮิรตซ์ แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ ได้ดังรูปที่ 4.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แสดงผลสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 10.7 เมกกะเฮิรตซ์

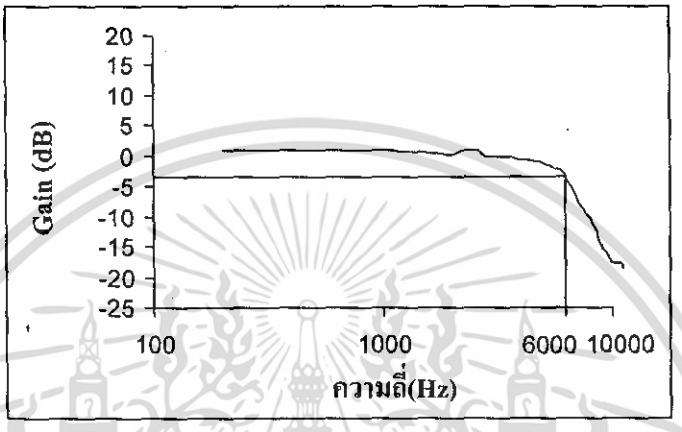
จากนั้นนำสัญญาณเอฟเอ็มที่ความถี่ 10.7 เมกกะเฮิรตซ์ไปผสมกับ 10.245 เมกกะเฮิรตซ์ ที่มาจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ ได้สัญญาณเอฟเอ็มความถี่ 455 กิโลเฮิรตซ์ แสดงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 455 กิโลเฮิรตซ์ได้ดังรูปที่ 4.34 จากนั้นนำสัญญาณเอฟเอ็มความถี่455เมกกะเฮิรตซ์ไปดีมอดูเลตโดยใช้ Quadrature Diacriminator ได้สัญญาณข่าวสารที่ต้องการ



รูปที่ 4.34 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 455 กิโลเฮิรตซ์

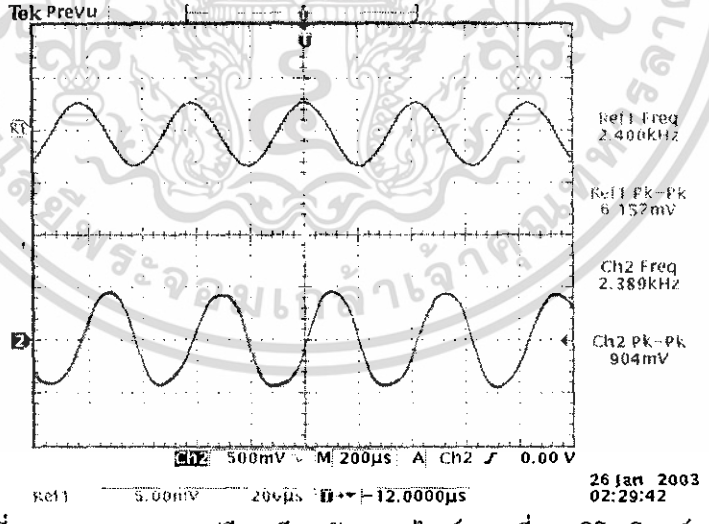
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากวงจรเอฟเอ็มดีเทคเตอร์เป็นสัญญาณที่มีค่าความถี่หลายค่าผสมกันมา จึงจำเป็นต้องมีวงจร Low pass Filter เพื่อกรองเฉพาะสัญญาณข่าวสาร โดยเลือกใช้วงจร Low pass Filter แบบ Butterworth ที่มีความถี่ cut off 6 kHz หลังจากการออกแบบและทดลองสามารถแสดงกราฟคุณสมบัติของวงจรLow pass Filter ได้ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แสดงคุณสมบัติของวงจรLow pass Filter

เมื่อนำวงจร Low pass Filter นี้ มาต่อรวมเข้ากับวงจรเอฟเอ็มดีเทคเตอร์ก็จะสามารถกรองเอาสัญญาณข่าวสารออกมาได้ดังรูปที่ 4.36

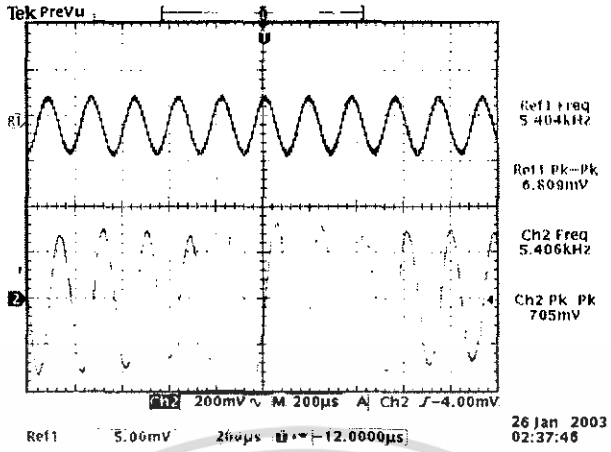


รูปที่ 4.36 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์ความถี่ 2.4 กิโลเฮิรตซ์ กับสัญญาณที่เอาต์พุตของ IC13135

Ref 1 คือ สัญญาณไซน์ความถี่ 2.4 กิโลเฮิรตซ์ก่อนจะถูกมอดูเลตทางภาคส่ง

Ch2 คือ สัญญาณที่ออกจาก IC13135 ซึ่งผ่านวงจร Low pass Filter ทางภาครับ

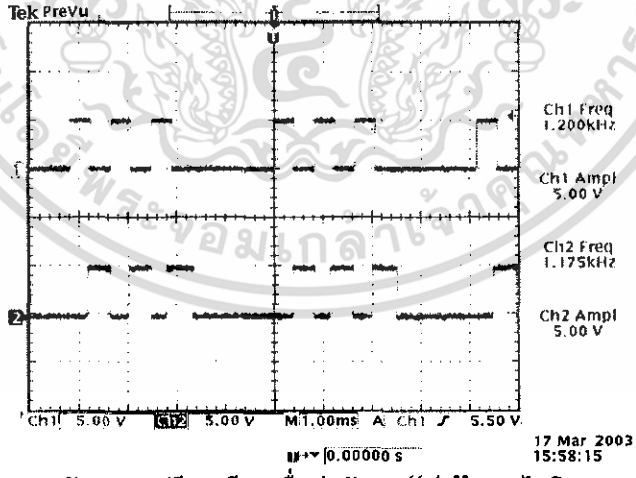
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณไซน์ความถี่ 5.4 กิโลเฮิรตซ์
กับสัญญาณที่เอาต์พุตของ IC13135
Ref 1 คือ สัญญาณไซน์ความถี่ 5.4 กิโลเฮิรตซ์ก่อนจะถูกมอดูเลตทางภาคส่ง
Ch2 คือ สัญญาณที่ออกจาก IC13135 ซึ่งผ่านวงจร Low pass Filter ทางภาครับ

4.8 แสดงผลการส่งและรับสัญญาณโดยวิธีการไร้สาย

จากการทดลองได้ส่งสัญญาณอักษร“A”จากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่วงจรเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์เข้าเครื่องส่งสัญญาณเอฟเอ็ม แล้วทำการรับสัญญาณดังกล่าวที่เครื่องรับสัญญาณเอฟเอ็มแล้วนำมาผ่านวงจรเอฟเอสเคดีมอดูเลเตอร์จะได้สัญญาณดังรูปที่4.38จะเห็นว่ารูปสัญญาณที่รับได้จากวิธีการไร้สาย มีรูปลัญญาณลักษณะเดียวกับสัญญาณอักษร “A” จากไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.38 แสดงสัญญาณเปรียบเทียบเมื่อส่งอักษร “A” จากไมโครคอนโทรลเลอร์
และสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ
Ch 1 คือ สัญญาณอักษร “A” ที่จะทำการส่งก่อนเข้าเอฟเอสเคมอดูเลเตอร์
Ch 2 คือ สัญญาณอักษร “A” ที่รับได้ทางเครื่องรับหลังผ่านเอฟเอสเคดีมอดูเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 คุณสมบัติของสายอากาศ

ในโครงงานนี้ได้นำสายอากาศไดโพลมาใช้งานจึงทำการคำนวณหาค่า farfield

จากสูตร $$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

$$D = 54 \ cm \ , \lambda = 2.22 \ m$$

ได้ระยะ farfield $$R \geq 0.263 \ m$$

คุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศโมโนโพลคือมีรูปแบบการกระจายคลื่นเป็นแบบ Omnidirectional และยังสามารถหาคุณสมบัติของสายอากาศต่างๆได้ดังนี้

ช่วงความถี่ที่ใช้งานพิจารณาจากทฤษฎีค่า VSWR ซึ่งคืออัตราส่วนแรงดันค่าสูงที่สุดและค่าต่ำที่สุดของคลื่นนิ่ง (voltage standing wave ratio)

คำนวณได้จากสูตร $$VSWR = \frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{E_i + E_r}{E_i - E_r}$$

E_{max} = ค่าแรงดันที่สูงที่สุดของคลื่นนิ่ง

E_{min} = ค่าแรงดันที่ต่ำที่สุดของคลื่นนิ่ง

E_i = ค่าขนาดของแรงดันที่คลื่นตกกระทบ

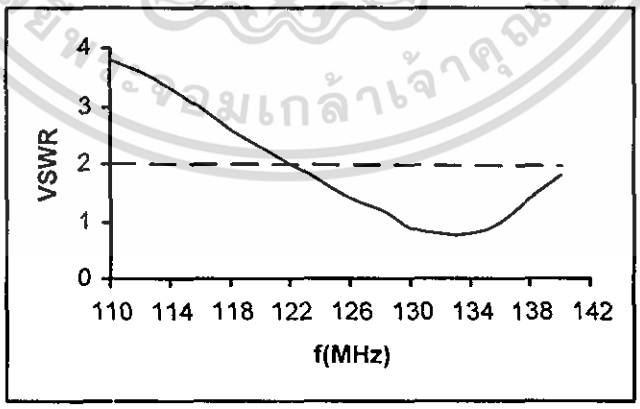
E_r = ค่าขนาดของแรงดันที่คลื่นสะท้อน

ควรมีค่าไม่เกิน 2 ในช่วง bandwidth ที่ใช้งาน จากการวัดค่า VSWR อยู่ในช่วงความถี่ 122.6 -140 MHz ที่ใช้งาน โดยใช้ Network Analyzer ในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศซึ่งได้ค่าต่างๆดังนี้

ค่า Impedance ที่ความถี่ด้านส่ง 135.7 MHz Z=63.352+j5.3965

ค่า SWR ที่ความถี่ด้านส่ง 135.7 MHz เท่ากับ 1.4 :1 คือค่า SWR ที่ normalize ค่า E_{min} เท่ากับ 1

ค่า Return Loss ที่ความถี่ด้านส่ง RL= -17.93 dB



รูปที่ 4.39 แสดงค่าของ VSWR ของสายอากาศที่ใช้ในโครงงานนี้

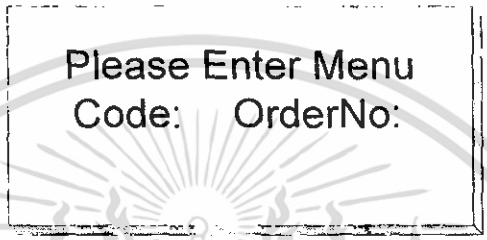
ดังนั้นสายอากาศที่นำมาใช้สามารถใช้งานได้กับเครื่องสั่งอาหารไร้สายนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

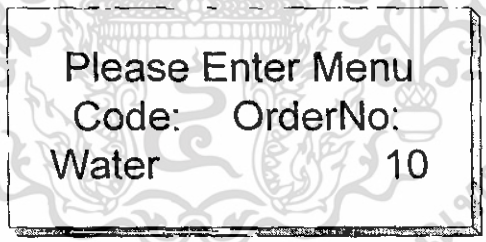
จากการได้ทดลองต่อวงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรายการอาหารจากลูกค้าแล้วให้มีการแสดงผลทางหน้าจอ LCD พร้อมทั้งทำการส่งข้อมูลไปยังตัวรับ(Computer) โดยใช้สายส่งได้ผลดังนี้
และส่งข้อมูลโดยใส่สายส่งแล้วให้มีการแสดงผลทางด้านที่รับข้อมูลจากลูกค้ามาแสดงโดยจอ LCD ได้ผลดังนี้

1.เมื่อมีลูกค้าเข้ามาในร้านอาหารและนั่งที่โต๊ะซึ่งที่โต๊ะจะมีเครื่องสั่งอาหารวางอยู่ที่หน้าจอมีข้อความดังรูปที่ 4.40 ให้ลูกค้าทำการกดปุ่ม *New Order* เพื่อทำการเริ่มต้นการทำงาน



รูปที่4.40 แสดงขั้นตอนแรกของการทำงานของเครื่องสั่งอาหาร

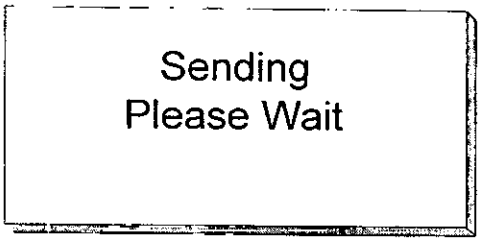
2.จากนั้นลูกค้าจะทำการสั่งอาหารผ่านเครื่องสั่งอาหารด้วยตนเอง โดยเลือกจากรายการและราคาของอาหารที่เมนู โดยการสั่งอาหารนั้นทำได้โดยใส่รหัสสามหลักของรายการอาหารจากเมนูดังรูปที่ 4.41 แล้วกด Enter เพื่อสั่งอาหารรายการนั้น แต่ถ้าสั่งผิด ก็สามารถกดปุ่ม *CLR* เพื่อทำการยกเลิกรายการนั้นได้



รูปที่ 4.41 แสดงหน้าจอขณะทำการสั่งอาหาร

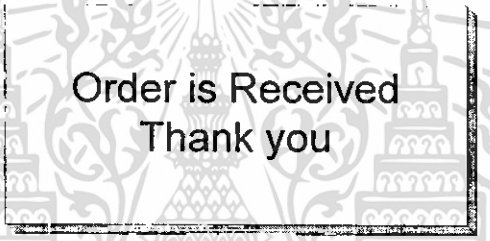
3.เมื่อได้สั่งอาหารตามความพอใจแล้ว ลูกค้าจะทำการกดปุ่ม Send เพื่อส่งรายการอาหารที่ได้สั่งไปแล้ว ส่งไปยังเครื่องรับ และที่หน้าจอของเครื่องสั่งอาหารจะปรากฏข้อความแสดงการส่งข้อมูลดังรูปที่ 4.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงหน้าจอขณะทำการส่งรายการอาหาร

4.ในขณะที่ด้านรับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการเก็บข้อมูลที่ถูกส่งมาจากเครื่องส่งแล้วทำการส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลและเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์รับข้อมูลเรียบร้อยแล้วจะส่งสัญญาณมายืนยันผลการรับข้อมูล ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งค่ายืนยันมายังตัวส่งเช่นกัน หน้าจอจะปรากฏ ดังรูปที่4.43



รูปที่ 4.43 แสดงหน้าจอเมื่อได้รับสัญญาณยืนยันการรับรายการอาหารเรียบร้อยแล้ว

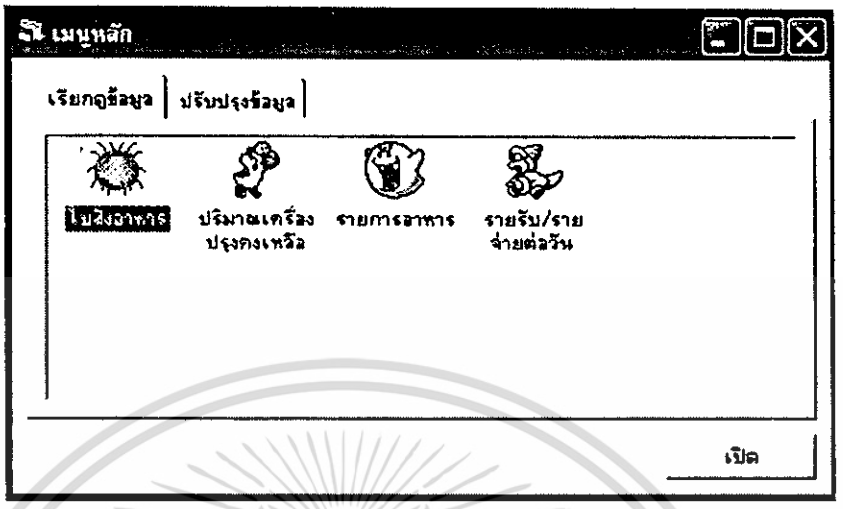
5.หน้าจอจะกลับมาแสดงดังรูปที่ 4.40 เพื่อรับการสั่งอาหารรายการอื่นๆต่อไป

4.11 การแสดงผลทางคอมพิวเตอร์

เมื่อทำเครื่องรับทำการรับข้อมูลแล้ว คอมพิวเตอร์จะทำงานดังนี้

1. ทำการเก็บข้อมูลที่รับมาได้ไว้ในตัวแปลชนิด Array ตามเบอร์โต๊ะที่รับมาได้
2. ทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่รับมาได้ว่าเป็นข้อมูลที่มีรหัสอาหารตรงกับในฐานข้อมูลที่เก็บไว้ตัวใด ถ้าเปรียบเทียบตรงกลับรายการอาหารตัวใด ก็จะทำการแสดงชื่ออาหาร,ราคาต่อหน่วยและราคารวมทั้งหมด
3. ต่อมาจะทำการเปรียบเทียบว่ารายการอาหารที่รับมาต้องใช้เครื่องปรุงที่มีรหัสใดบ้างตามฐานข้อมูลที่เก็บไว้ เมื่อเปรียบเทียบพบว่าเป็นรหัสใด ก็จะทำการลดเครื่องปรุงนั้นลงตามปริมาณที่ใช้
4. เมื่อต้องการจะดูว่าโต๊ะไหนมีการสั่งอาหารใดบ้างก็ทำการคลิกที่ไอคอน"ใบสั่งอาหาร"จะทำการแสดงผลรายการอาหารที่ลูกค้าสั่งมาดังรูปที่ 4.44,4.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

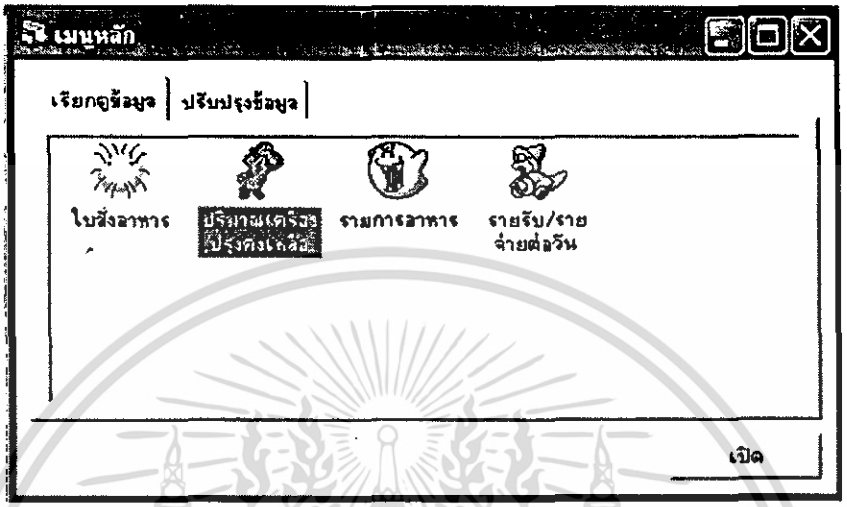


รูปที่ 4.44 แสดงวิธีการเรียกดูใบสั่งอาหาร

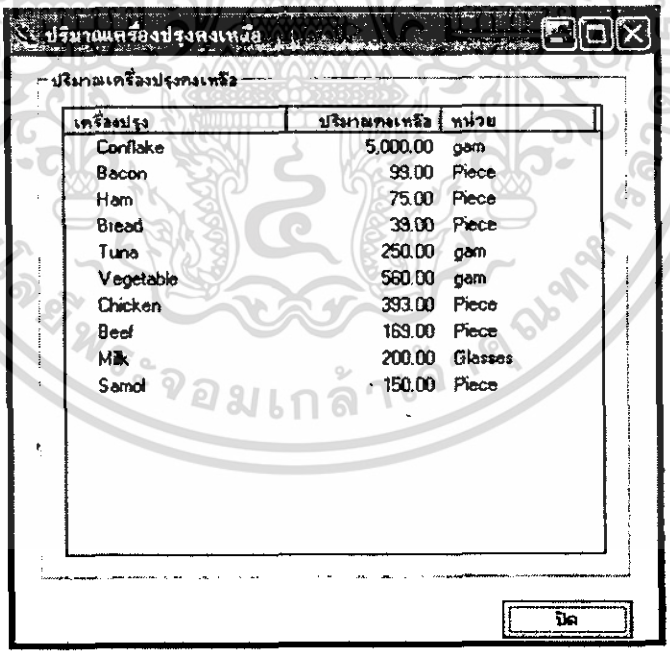
รูปที่ 4.45 แสดงใบรายการอาหารโต๊ะที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ถ้าจะดูปริมาณเครื่องปรุงที่คงเหลือ ให้ทำการคลิกที่ไอคอน "ปริมาณเครื่องปรุงคงเหลือ" ดังรูป ที่ 4.46 และจะแสดงผลดังรูปที่ 4.47



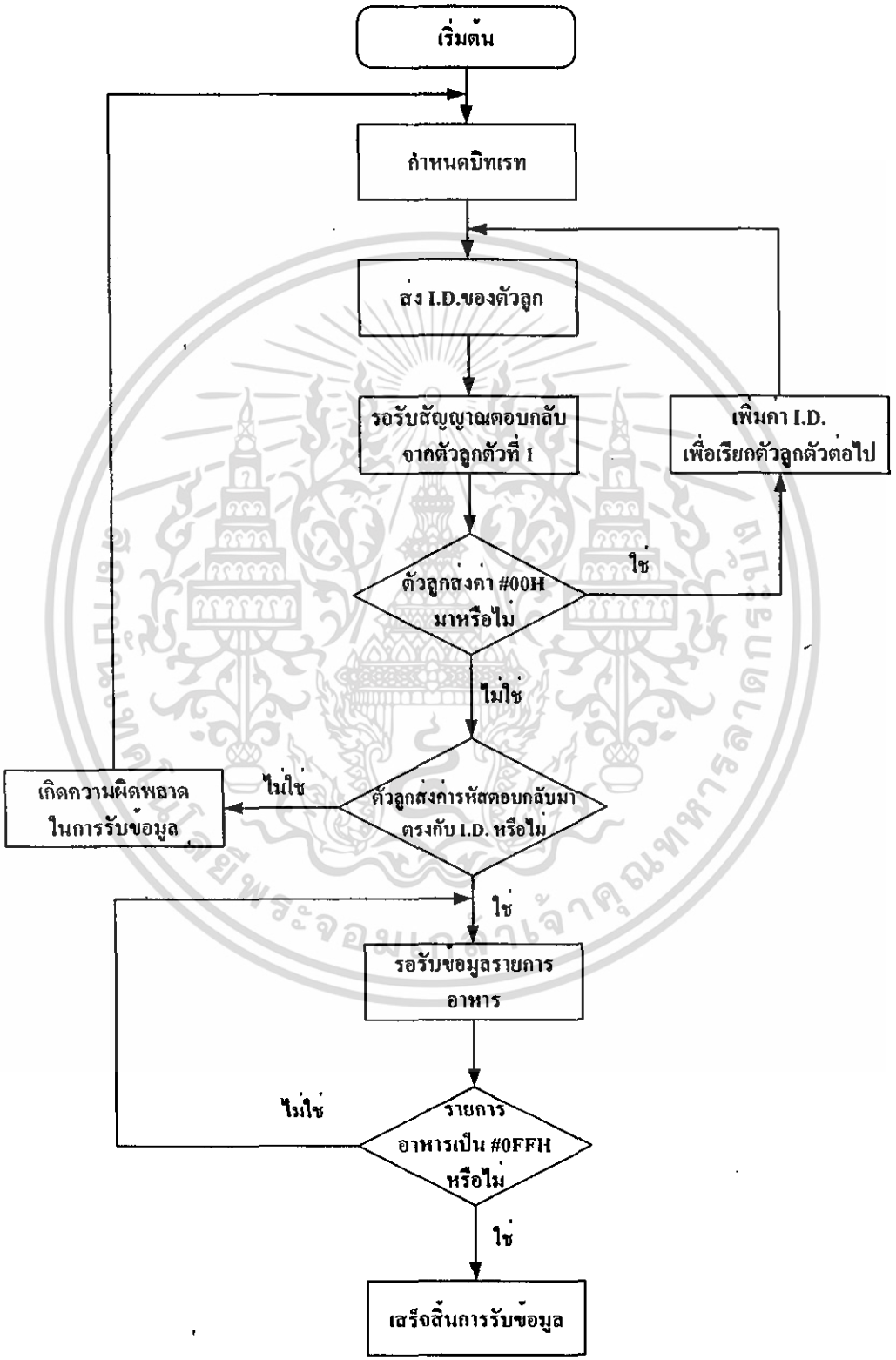
รูปที่ 4.46 แสดงวิธีการเรียกดูใบสั่งอาหาร



รูปที่ 4.47 แสดงปริมาณเครื่องปรุงอาหารที่เหลืออยู่

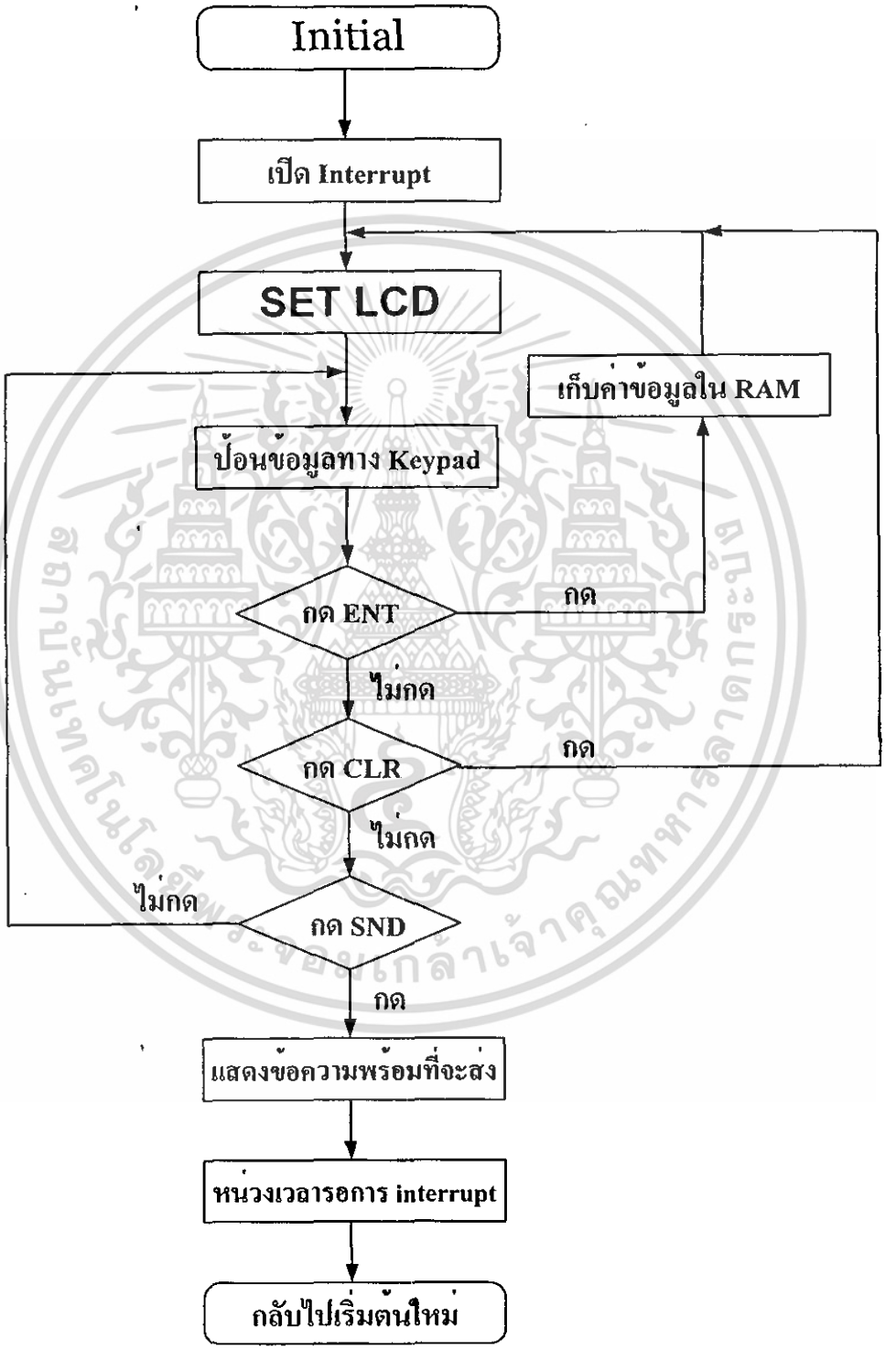
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 Flowchart Master (คอมพิวเตอร์)



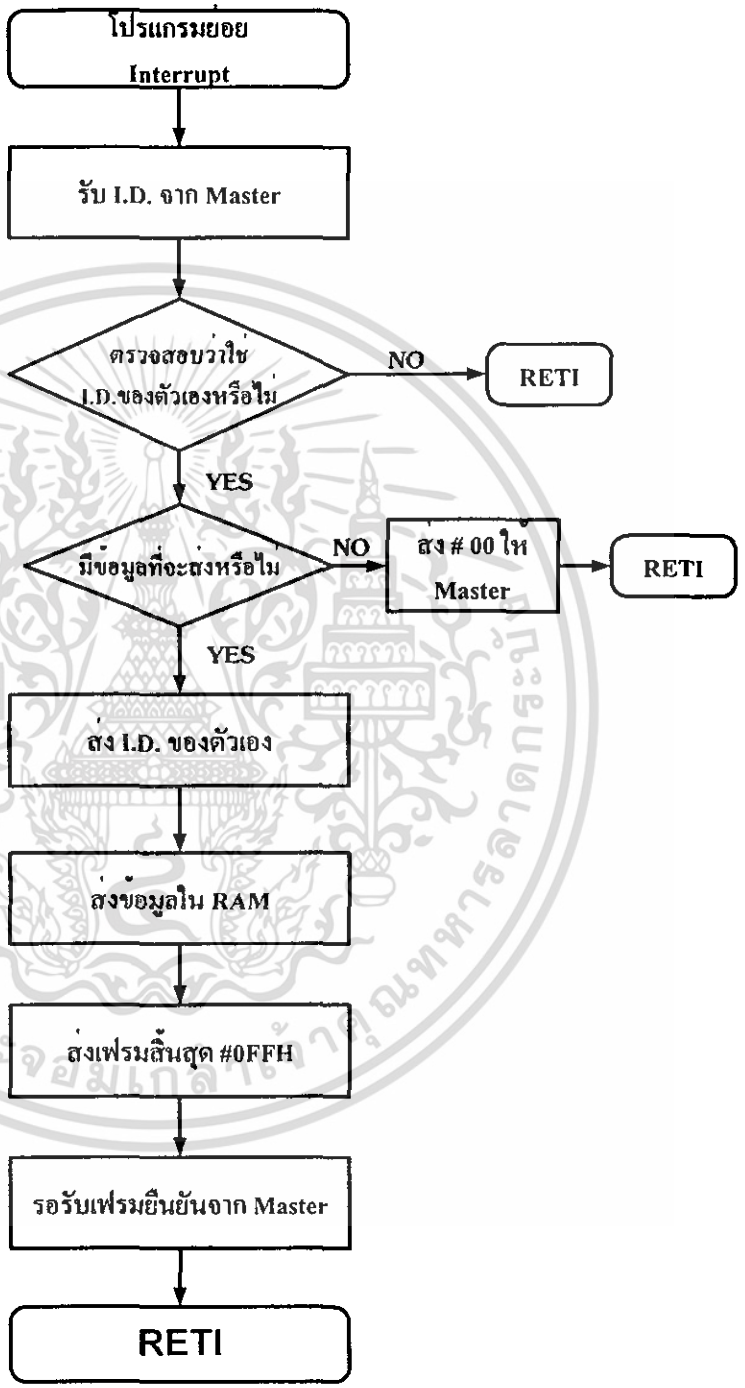
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 Flowchart Slave(ไมโครคอนโทรลเลอร์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 Flowchart Interrupt



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15 Flowchart การแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] สมยศ จุณณะปิยะ , การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์, พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพ :2543

[2] เกษียร สินธุวงษ์และโฆษวัฒน์ สุขฉายา, "**เครื่องสั่งอาหารไร้สาย**", ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2541

[3] วรรณภา เลาวาณิชกุลและวิภาดา หัวใจแก้ว, " เครื่องกำเนิดสัญญาณโดยวิธีสังเคราะห์ความถี่", ปริญญานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2538

[4] กิตกิ ภักดีวัฒนะกุลและจำลอง ครูอุตสาหะกุล. "Visual Basic ฉบับฐานข้อมูล". พิมพ์ครั้งที่ 4.กรุงเทพฯ : เคทีพี คอมพ์ แอนด์คอนซัลท์ จำกัด, 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์

จากการศึกษาและสร้างเครื่องสั่งอาหารไร้สายนี้ขึ้นมาเครื่องสามารถที่จะทำงานได้ดังนี้ลูกค้าสามารถสั่งอาหารได้โดยการกดคีย์แพดเป็นรหัสตามรายการอาหารที่ต้องการสั่ง แล้วกดคีย์ ENT และ SND เพื่อทำการส่งอาหารไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการส่งไปเข้ารหัสข้อมูลแล้วส่งข้อมูลดังกล่าวออกอากาศทางเครื่องส่ง แล้วรับข้อมูลทางเครื่องรับ ต่อจากนั้นเครื่องรับจะทำการถอดรหัสข้อมูลแล้วส่งรายการอาหารไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะนำข้อมูลที่ได้ไปเทียบกับฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วแสดงผลเป็นรายการอาหารที่ลูกค้าสั่งมา พร้อมกันนั้นจะทำการลดจำนวนเครื่องปรุงในรายการที่ลูกค้าสั่งมาด้วย ทำให้สามารถทราบได้ว่ามีเครื่องปรุงเหลืออยู่เท่าไหร่

ปัญญาที่พบคือที่เครื่องรับเมื่อทำการดีมอดูเลตสัญญาณข่าวสารคืนมาได้แล้ว แต่มีผลการรบกวนจากความถี่ที่สร้างจากวงจรสังเคราะห์ซึ่งมีความถี่ที่สูงกว่าความถี่ข่าวสาร จึงต้องทำการออกแบบวงจรที่สามารถลดการรบกวนนี้ได้

แนวทางในการพัฒนา คือ สามารถนำหลักการทำงานของเครื่องสั่งอาหารไร้สายนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้ เช่น สร้างเครื่องจำหน่ายตั๋วชมภาพยนตร์อัตโนมัติ, สร้างเครื่องจำหน่ายตั๋วรถโดยสารอัตโนมัติ ทำให้สะดวกและประหยัดรายจ่ายในการจ้างพนักงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้