



เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer)
ที่ย่านความถี่ 470 - 490 MHz

โดย

นางสาวจุฑารัตน์	ปันสีคำ	B4601432
นายณัฐพัชร์	พรหมสุวรรณ	B4608905
นายสุภกิตติ	ศิริพนาตร	B4609469

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม
และวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2549
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง
พ.ศ. 2545 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการ	เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) ที่ย่านความถี่ 470-490 MHz		
ผู้ดำเนินงาน	นางสาวจุฑารัตน์	ปิ่นสีคำ	รหัสประจำตัว B4601432
	นายณัฐพัชร์	พรหมสุวรรณ	รหัสประจำตัว B4608905
	นายศุภกิตติ์	ศิริพนาดร	รหัสประจำตัว B4609469
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ชานูชัย ทองโสภ		
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม		
ภาคการศึกษา	3/2549		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเรื่องเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) ที่ย่านความถี่ 470 MHz ได้นำเสนอการออกแบบเครื่องสังเคราะห์ความถี่ที่สามารถปรับค่าได้ในย่านความถี่ 470-490 MHz ซึ่งประกอบด้วยวงจรที่สำคัญได้แก่ วงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillators VCO) วงจรกรองสัญญาณต่ำผ่าน (Low pass filter) และวงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase detector) โดยที่วงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดันจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่พาหะและจะทำการเปรียบเทียบเฟสที่วงจรเปรียบเทียบเฟสกับความถี่อ้างอิง (Frequency reference) โดยที่เอาท์พุทจากวงจรเปรียบเทียบเฟสจะเป็นค่าแรงดัน (Voltage) ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าแรงดันนี้จะไปทำการควบคุมการกำเนิดความถี่ให้อยู่ในสถานะล็อก (Lock) โดยที่ความถี่ที่ได้นั้นใช้เป็นความถี่พาหะในการออกแบบวงจรเครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) หรือวงจรเครื่องรับสัญญาณ (Receiver) ได้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการเรื่องเครื่องสังเคราะห์ความถี่ความถี่ (Frequency Synthesizer) ที่ย่านความถี่ 470-490 MHz นี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องด้วยความกรุณาของบุคคลหลายด้าน ซึ่งคอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ รวมถึงข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ ในการทำโครงการครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณ

- อาจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ที่มอบความรู้และโอกาสให้คณะผู้จัดทำและยังคอยให้คำปรึกษาต่างๆ
- คุณประพล จาระตะคุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานเกี่ยวกับงบประมาณ ตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในโครงการ
- บุพการีอันเป็นที่รัก ที่คอยให้การสนับสนุนและกำลังใจด้วยดีตลอดมา
- สมาชิกภายในกลุ่มที่คอยช่วยเหลือกันและให้กำลังใจตลอดการทำงาน
- เพื่อนกลุ่มอื่นๆที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือกัน

นางสาวจุฑารัตน์

ปิ่นสีคำ

นายณัฐพัชร์

พรหมสุวรรณา

นายศุภกิตติ

ศิริพนาดร

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
- บทคัดย่อ	ก
- กิตติกรรมประกาศ	ข
- สารบัญ	ค
- สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบข่ายโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ทฤษฎีเฟสล็อกกลูป	4
2.2 องค์ประกอบของลูป	5
2.3 พฤติกรรมของลูป	8
2.4 ผลตอบสนองความถี่ของลูปและแถบความถี่	12
2.5 การประยุกต์ใช้งานดีมอดูเลตของเฟสล็อกกลูป	18
2.6 การปรับปรุงผลตอบสนองของลูป	19
2.7 วงจรสังเคราะห์ความถี่	23
2.8 วงจรสังเคราะห์ความถี่ในทางปฏิบัติ	28
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรเฟสล็อกกลูป	29
3.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรเฟสล็อกกลูป	29
3.2 การเลือกไอซีในการออกแบบวงจรเฟสล็อกกลูป	31
3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)	35
3.4 การพิจารณาผลการตอบสนองของระบบ	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรเฟสล็อกคูล (ต่อ)	
3.5 การออกแบบ Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632	42
3.6 การเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ในการจูน Center Frequency ของไอซี MAX2608	48
3.7 การออกแบบวงจรตรวจจับสถานะล็อก	49
3.8 การออกแบบและการทำงานของวงจร IC Dipswitch	50
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องส่งเคราะห์ความถี่	53
บทที่ 5 บทสรุป	71
5.1 ส่วนประกอบเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ย่าน 470-490 MHz	71
5.2 คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ย่าน 470-490 MHz	71
5.3 ปัญหาที่พบในขั้นตอนการทำงาน	72
5.4 ข้อจำกัดของโครงการ	72
5.5 ผลที่ได้จากโครงการนี้	72
5.6 แนวทางการพัฒนาต่อไป	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก รายละเอียดลายวงจรแผ่นทองแดง	76
ภาคผนวก ข รายละเอียดของการกำหนดความถี่โดยการ Dipswitch	78
ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์ที่จำเป็น	117
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงผังไดอะแกรม โครงงานเครื่องสังเคราะห์ความถี่ที่ย่านความถี่ 470 MHz	3
รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	4
รูปที่ 2.2.1 แพนผังวงจร	5
รูปที่ 2.2.2 วงจรขยายออปแอมป์ที่ช่วยในการเพิ่มอัตราขยายกลุ๊ป	6
รูปที่ 2.2.3 วงจรแกว่งควบคุมโดยใช้ไดโอดความแรงเตอร์ในวงจรมัลติไวเบเตอร์	7
รูปที่ 2.2.4 คุณลักษณะของ VCO	8
รูปที่ 2.3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	9
รูปที่ 2.3.2 ความถี่บีตของสัญญาณขาออกที่ V_o	9
รูปที่ 2.3.3 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ปในช่วงของโหมดการติดตาม	11
รูปที่ 2.3.4 แรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟส (V_p) กับค่าคลาดเคลื่อนเฟส (θ_o)	12
รูปที่ 2.4.1 ผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยาย VCO $k_o (f)$	13
รูปที่ 2.4.2 เฟสล็อกกลุ๊ปที่ยังไม่มีวงจรกรองสำหรับชดเชยกลุ๊ป	15
รูปที่ 2.4.3 ผลตอบสนองความถี่กลุ๊ปเปิด และกลุ๊ปปิดของวงจรเฟสล็อกกลุ๊ปที่ไม่มีการชดเชย	16
รูปที่ 2.4.4 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ปที่ไม่มีการชดเชย	16
รูปที่ 2.6.1 เฟสล็อกกลุ๊ปที่มีการชดเชยด้วย RC	20
รูปที่ 2.6.2 ผลตอบสนองขั้นบันไดของ RLC ลำดับที่ 2 แบบหน่วงขาด	20
รูปที่ 2.7.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลหลายๆตัว	24
รูปที่ 2.7.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลตัวเดียว	25
รูปที่ 2.7.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ๊ป	27
รูปที่ 2.7.4 วงจรสังเคราะห์ความถี่แบบ Prescaled (Prescaled Synthesizer)	27
รูปที่ 3.1 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ปที่ทำการออกแบบเบื้องต้น	30
รูปที่ 3.2 Functional Diagram ของ MAX2608	31
รูปที่ 3.3 ไอซีเบอร์ MAX2632	32
รูปที่ 3.4 Functional Diagram ของ MAX2632	32
รูปที่ 3.5 ไอซีเบอร์ MC12032A	33
รูปที่ 3.6 Logic Diagram ของ MC12032A	33
รูปที่ 3.7 ไอซีเบอร์ MC145152P2	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่3.8 Block Diagram ของ MC12032A	34
รูปที่3.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	35
รูปที่3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จากการคำนวณ	38
รูปที่3.11 Block Diagram of Phase Locked Loop	39
รูปที่3.12 Active filters Design	39
รูปที่3.13 Active filter ที่คำนวณได้	40
รูปที่3.14 block diagram ที่ได้	41
รูปที่3.15 แผนภาพ โบค	41
รูปที่3.16 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 กับ สายส่งสัญญาณ	42
รูปที่3.17 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632	44
รูปที่3.18 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632	45
รูปที่3.19 Smith Chart	47
รูปที่3.20 แสดงกราฟค่าตัวเหนี่ยวนำในการเลือก Center Frequency	48
รูปที่3.21 วงจรตรวจจับสภาวะล๊อค	49
รูปที่4.1 SPECTRUM ANALYZER	53
รูปที่4.2 OSCILLOSCOPE	54
รูปที่4.3 DC POWER SUPPLY	54
รูปที่4.4 แสดงเอาต์พุตที่ออกจวงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดัน	55
รูปที่4.5 แสดงความถี่อ้างอิงที่ 10MHz	55
รูปที่4.6 แสดงเอาต์พุตที่ได้จากตัวหาร	56
รูปที่4.7 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_v ขณะล๊อค	57
รูปที่4.8 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_R ขณะล๊อค	57
รูปที่4.9 แสดงเอาต์พุตที่ออกจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านขณะล๊อค	58
รูปที่4.10 แสดงสัญญาณที่ออกจากวงจรเฟสล๊อคคู่เมื่อเกิดการล๊อค	58
รูปที่4.11 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารA	59
รูปที่4.12 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารA	59
รูปที่4.13 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารA	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่4.14 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารN	60
รูปที่4.15 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารN	61
รูปที่4.16 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารN	61
รูปที่4.17 แสดงความถี่ที่ได้จากการหารN	62
รูปที่4.18 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_v ขณะไม่ลือก	62
รูปที่4.19 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_R ขณะไม่ลือก	63
รูปที่4.20 แสดงเอาท์พุทที่ออกจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านขณะไม่ลือก	63
รูปที่4.21 แสดงสัญญาณที่ออกจากวงจรเฟสลือกคู่เมื่อเกิดการไม่ลือก	64
รูปที่4.22 แสดงวงจรตรวจจับสภาวะลือก	64
รูปที่4.23 แสดงวงจรสังเคราะห์ความถี่	65
รูปที่4.24 แสดงวงจรโดยรวมทั้งหมด	65
รูปที่4.25 แสดงวงจรภายในกล่อง	66
รูปที่4.26 แสดงวงจรภายในกล่องด้านวงจรสังเคราะห์ความถี่	66
รูปที่4.27 แสดงวงจรภายในกล่องด้านวงจรตรวจจับสภาวะลือก	67
รูปที่4.28 แสดงวงจรโดยรวมทั้งหมด	67
รูปที่4.29 แสดงภาพการจ่ายไฟประมาณ 5 โวลต์ให้กับวงจร	68
รูปที่4.30 แสดงภาพการเกิดสภาวะลือก	68
รูปที่4.31 แสดงภาพการเกิดสภาวะลือก	69
รูปที่4.32 แสดงภาพด้านหลังของชิ้นงาน	69
รูปที่4.33 แสดงภาพจากด้านบนของชิ้นงาน	70
รูปที่ก-1 ลายวงจรเฟสลือกคู่	77
รูปที่ก-2 ลายวงจรตรวจจับสภาวะลือก	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

เฟสล็อกลูป (Phase lock loop) ได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบอิเล็กทรอนิกส์สื่อสาร อย่างเช่นการมอดูเลต การดีมอดูเลต การสร้างความถี่ และการสังเคราะห์ความถี่ เฟสล็อกลูปได้ถูกนำมาใช้ทั้งในวงจรภาคส่ง และวงจรภาครับของทั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์สื่อสารเชิงแอนะล็อก และระบบอิเล็กทรอนิกส์สื่อสารเชิงดิจิทัลที่รวมทั้งการส่งแบบพัลส์ดิจิทัล อย่างไรก็ตามในหลายๆปีก่อน การใช้เฟสล็อกลูปยังมีค่อนข้างน้อยเนื่องจากยังมีราคาแพงอยู่ ขนาดวงจรที่ใหญ่ แลบบความถี่แคบ รวมทั้งมีความซับซ้อนในการใช้งาน แต่ในปัจจุบันเมื่อได้มีแนวคิดค้นวงจรรวมขนาดใหญ่ วงจรเฟสล็อกลูปจึงมีขนาดเล็กลง ง่ายต่อการใช้งาน และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ดังนั้นวงจรเฟสล็อกลูปจึงได้เปลี่ยนเทคนิคในการออกแบบเพื่อใช้งานเฉพาะมาเป็นบล็อกโครงสร้างที่สามารถใช้งานได้ทั่วไป และที่หลากหลายนมากขึ้น ปัจจุบันนี้ผลิตภัณฑ์วงจรรวมของวงจรเฟสล็อกลูปที่แตกต่างกันหลายๆตัวได้ถูกผลิตมาจากโรงงานผลิตวงจรรวมหลายๆแห่ง โดยบางส่วนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้ออกแบบไปเป็นวงจรที่มีจุดประสงค์ใช้งานทั่วไปเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย ในขณะที่บางส่วนนั้นอาจจะออกแบบมาให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น การตรวจจับเสียงสัญญาณ (Tone detection) การถอดรหัสสเตอริโอ (stereo decoding) และการสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesis) เป็นต้น วงจรเฟสล็อกลูปนั้นจะเป็นระบบควบคุมป้อนกลับแบบปิด (Closed-loop feedback control system) โดยมีสัญญาณที่ป้อนกลับอยู่ในรูปของความถี่ ดังนั้นวงจรเฟสล็อกลูปนี้สามารถใช้ในการปรับเล็กลความถี่ที่ตั้งไว้ได้ตามต้องการ และการกรองสัญญาณโดยปราศจากขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำ

1.2 วัตถุประสงค์

1. สามารถนำความรู้ที่ได้มาจากการศึกษาจากภาคทฤษฎีของวิชาต่างๆ ที่ได้ศึกษามาปฏิบัติ และประยุกต์ใช้เพื่อสร้างชิ้นงานขึ้นมาและสามารถนำไปใช้งานจริงได้
2. เพื่อศึกษาวิธีการและออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่
3. เพื่อศึกษาวิธีการและออกแบบชุดควบคุมความถี่ได้

1.3 ขอบข่ายของงาน

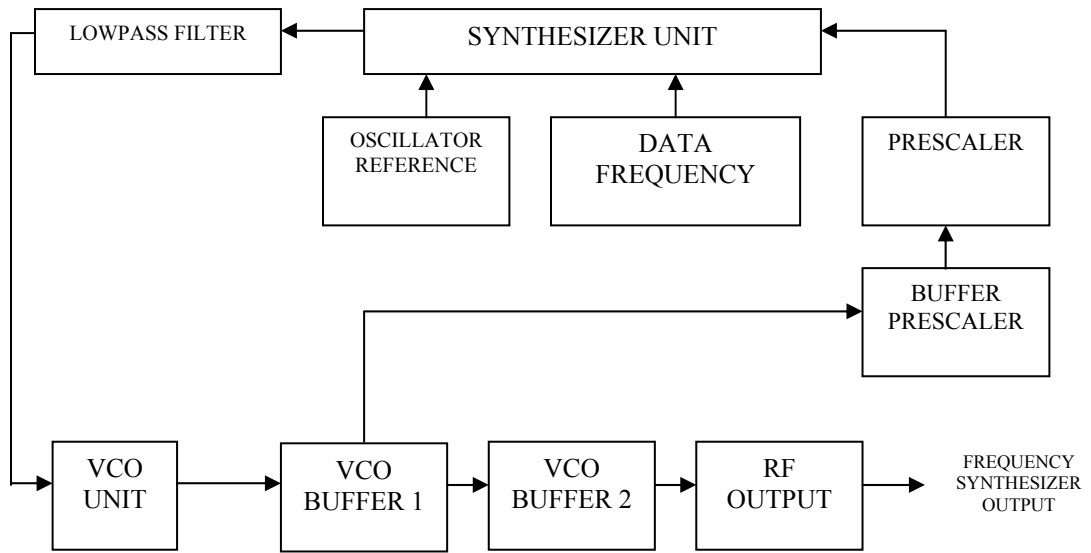
1. ศึกษาลักษณะการทำงานของวงจรสังเคราะห์ความถี่
2. ออกแบบและสร้างวงจรสังเคราะห์ความถี่
3. ออกแบบและสร้างวงจรควบคุมและแสดงผลการสังเคราะห์ความถี่
4. ออกแบบและสร้างวงจรมอดูเลเตอร์และขยายสัญญาณความถี่
5. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบทั้งหมดและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาตำราและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของวงจรสังเคราะห์ความถี่สูง
2. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในโครงการงาน
2. ออกแบบและสร้างวงจรเฟสล็อกูป
3. ออกแบบการควบคุมความถี่ของวงจรที่ได้ด้วยคิบบสิวิทซ์
4. ทดสอบและปรับปรุงแก้ไขวงจรสังเคราะห์ความถี่สูง
5. สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงาน โครงการงาน
6. สรุปและประเมินผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างเครื่องสังเคราะห์ความถี่ในช่วงความถี่ UHF
2. สามารถออกแบบชุดควบคุมความถี่ได้
3. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการประกอบวิชาชีพ
4. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ
5. สามารถแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการปฏิบัติงานได้
6. สามารถทำงานเป็นกลุ่มได้

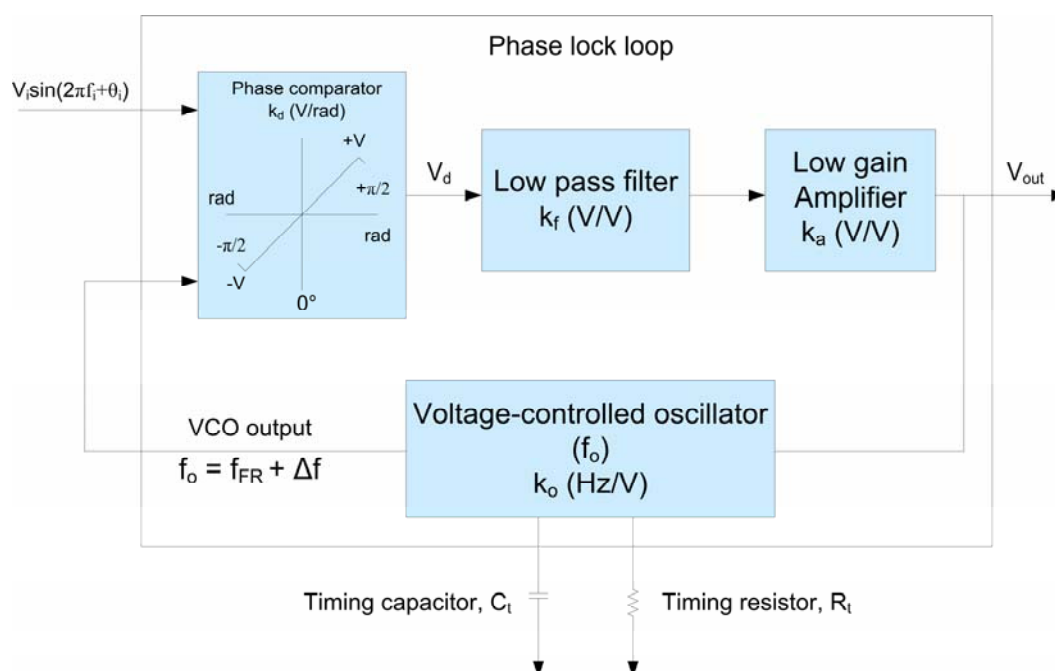


รูปที่ 1.1 แสดงผังไดอะแกรม โครงงานเครื่องสังเคราะห์ความถี่ที่ย่านความถี่ 470 MHz

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเฟสล็อกคูล



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกคูล

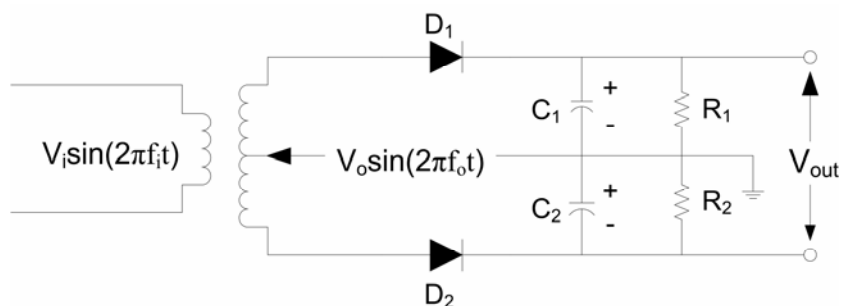
จากวงจรเฟสล็อกคูลดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักๆอยู่ 4 ตัวด้วยกันคือ วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase comparator) วงจรกรองผ่านต่ำ (Low-pass filter) วงจรขยายที่มีอัตราขยายต่ำ (Low-gain amplifier) และวงจรแกว่งควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled oscillator VCO) ขณะที่ไม่มีสัญญาณจากภายนอกเข้าวงจร แรงดันขาออก V_{out} ก็จะมีค่าศูนย์ และ VCO จะมีการตั้งค่าความถี่ทำงานเสรี f_n (Free-running frequency) ได้จากตัวต้านทาน R_t และตัวเก็บประจุ C_t ที่อยู่ภายนอกวงจร แต่ถ้ามีสัญญาณป้อนเข้าระบบ วงจรเปรียบเทียบเฟสก็จะเปรียบเทียบเฟส ระหว่างความถี่ของสัญญาณขาเข้ากับความถี่ทำงานอิสระของ VCO และให้แรงดันผิดพลาด V_d (Error voltage) ออกมาที่มีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างระหว่างเฟสกับความถี่ของสัญญาณทั้งสอง จากนั้นแรงดัน

ผิดพลาดนี้จะถูกกรองสัญญาณด้วยวงจรกรองผ่านต่ำและถูกขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายที่มีอัตราขยายต่ำ จากนั้นจึงถูกป้อนกลับไปยังขาเข้าของ VCO ถ้าให้ความถี่เข้า f_i เข้าใกล้ความถี่ทำงานอิสระ f_n ของ VCO ได้พอ ดังนั้นการป้อนกลับในวงจรเฟสล็อกจะทำให้ VCO ซิงโครไนส์หรือเกิดล็อกความถี่ของสัญญาณขาเข้าได้ซึ่งทำให้ความถี่ของ VCO เหมือนกันกับความถี่ของสัญญาณขาเข้า ยกเว้นแต่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฟส (Phase error) ที่เกิดจากเฟสของสัญญาณขาเข้าลบกับสัญญาณขาออกของ VCO

2.2 องค์ประกอบของลูป

2.2.1 วงจรเปรียบเทียบเฟส

วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase detector) เป็นอุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear-device) ที่ป้อนสัญญาณขาเข้าด้วยกัน 2 สัญญาณคือสัญญาณที่มีความถี่ f_i ที่สร้างจากภายนอก และสัญญาณขาออกจากวงจรแกว่งควบคุมแรงดันที่มีความถี่ f_o สำหรับสัญญาณขาออกวงจรเปรียบเทียบเฟสจะเป็นผลคูณของสัญญาณความถี่ f_i และ f_o ดังนั้นสัญญาณขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟสจึงประกอบไปด้วยสัญญาณที่มีความถี่ผลรวม และสัญญาณที่มีความถี่ผลต่าง ($f_i \pm f_o$) ด้วยกัน ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรผสมสัญญาณ โดยรูปที่ 2.2.1 แสดงถึงแผนผังวงจรเปรียบเทียบเฟสอย่างง่ายโดยมีสัญญาณ v_o ป้อนเข้าที่แท่งกลางของขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง T_1 พร้อมกับป้อนสัญญาณ v_i เข้าทางขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง T_1



รูปที่ 2.2.1 แผนผังวงจร

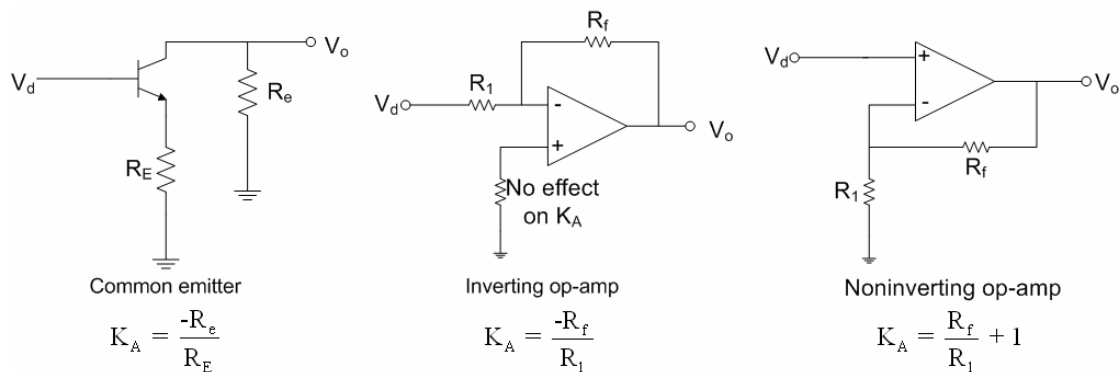
จากรูปที่ 2.2.1 ในส่วนของ D_1 , R_1 , และ C_1 จะประกอบกันเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น (Half-wave rectifier) เช่นเดียวกับในส่วนของ D_2 , R_2 และ C_2 โดยที่ $C_1 = C_2$ และ $R_1 = R_2$ ขณะช่วงครึ่ง

บวกของ v_o D_1 และ D_2 ก็จะไบอัสไปหน้า หรือนำกระแส และทำให้ C_1 และ C_2 เกิดการอัดประจุที่มีระดับแรงดันเท่ากัน แต่มีขั้วตรงข้ามกัน ดังนั้นแรงดันขาออกเฉลี่ยเป็น $V_{out} = V_{C1} + (-V_{C2})$ เท่ากับ และขณะช่วงครึ่งลบของ v_o จะไบอัสย้อนกลับหรือหยุดนำกระแส ดังนั้น C_1 และ C_2 ก็จะคายประจุเท่าๆกันผ่าน R_1 และ R_2 ตามลำดับ ซึ่งยังคงให้ระดับแรงดันขาออกมีค่าเป็น 0 V ซึ่งวงจรเรียงกระแสทั้งสองนี้จะให้แรงดันขาออกที่มีขนาดเท่ากันแต่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นแรงดันขาออกขณะที่แรงดัน v_o คงที่ และมีค่าเป็น 0 V โดยที่รูปคลื่นขาเข้า และขาออกเมื่อป้อนสัญญาณ VCO เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม

เมื่อมีการป้อนสัญญาณขาเข้าจากภายนอก $v_i = V_i \sin(2\pi f_i t)$ ให้แก่วงจรเปรียบเทียบเฟส โดยแรงดันนี้ไปรวมกับ v_o ซึ่งทำให้ C_1 และ C_2 มีการอัดประจุ และคายประจุที่ทำให้แรงดันขาออกมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามสัดส่วนของขนาดแรงดันขาเข้า v_i ที่ป้อนจากภายนอก

2.2.2 วงจรขยาย

องค์ประกอบในส่วนของที่ 2 ในเฟสล็อกคือวงจรขยาย (Amplifier) ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณ DC โดยมีหน้าที่ในการเพิ่มอัตราขยายลูป (Loop gain) ด้วยการขยายแรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟส รูปที่ 2.2.2 แสดงถึงวงจรขยายแรงดัน 3 วงจรที่มีค่าอัตราขยายแรงดันที่มีเป็น $k_a = A_v$ (แรงดันขาออก / แรงดันขาเข้า) แถบความถี่ของวงจรขยายกระแสตรงต้องมีค่าสูงพอเมื่อเทียบกับแถบความถี่ของลูป มิฉะนั้นก็จะไม่มีความเสถียรภาพเกิดขึ้นในวงจรเฟสล็อกได้ซึ่งอาจเกิดการแกว่งของสัญญาณได้ เนื่องจากค่าเลื่อนเฟสของลูปมีค่ามากเกินไปจนเกิดการป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback) เกิดขึ้นได้

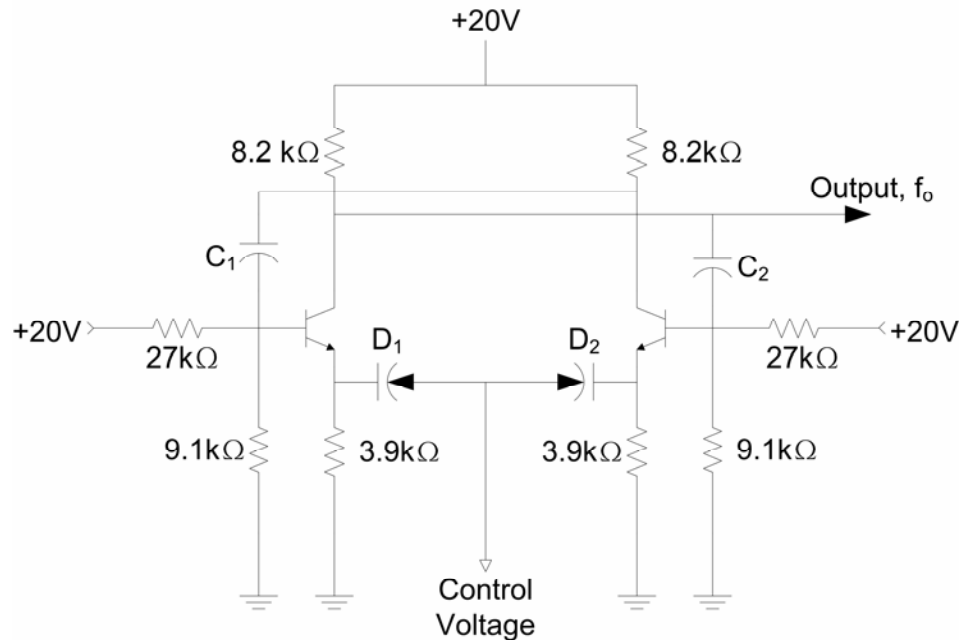


รูปที่ 2.2.2 วงจรขยายออปแอมป์ที่ช่วยในการเพิ่มอัตราขยายลูป

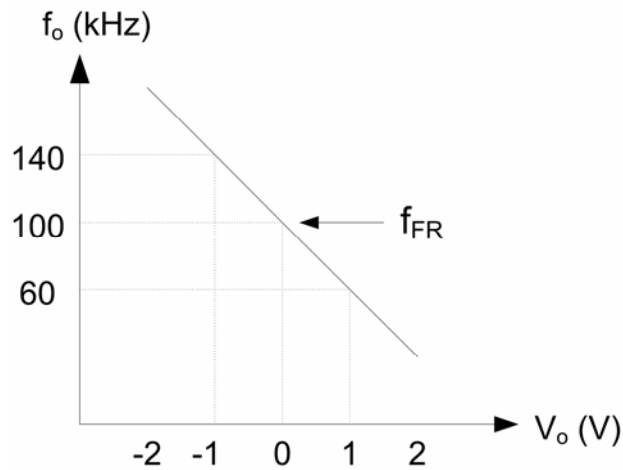
2.2.3 วงจรแกว่งควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรแกว่งที่ควบคุมแรงดัน (Voltage-controlled oscillator) ได้นำมาใช้เป็นวงจรมอดูเลตเชิงความถี่ โดยจะมีวงจรต่าง ๆ มากมายที่ใช้ในการควบคุมความถี่ของวงจรแกว่ง แต่วิธีที่ง่ายคือการใช้ตัวเก็บประจุที่แปรค่าตามแรงดัน หรือไดโอดวาร์เรกเตอร์ในวงจรมัลติไวเบเตอร์ เมื่อแรงดันไบอัสของไดโอดวาร์เรกเตอร์เปลี่ยนจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของวงจรแกว่งตามแรงดันไบอัสที่เปลี่ยนนั่นเอง ความถี่ทำงานเสรีของวงจรมัลติไวเบเตอร์ดังในรูปที่ 2.2.3 จะถูกควบคุมโดยค่ารีแอคแตนซ์ของ D_1 และ D_2 และค่าแรงดันควบคุมต้องมีค่าไม่เกิน $V_E + 0.5 \text{ V} + v_c$ โดย v_c เป็นค่ายอดทางบวกสูงสุดของสัญญาณวงจรแกว่งที่ตกคร่อม R_E และ 0.5 V เป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดซิลิกอนเมื่อมีการไบอัสไปหน้า คุณสมบัติของสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออกสำหรับ VCO จะแสดงได้ดังในรูปที่ 2.2.4 VCO ควรจะทำงานแบบเชิงเส้นระหว่าง 60 และ 140 kHz อัตราขยายของ VCO หาได้จาก

$$k_o = \frac{\Delta f_o}{\Delta V_o} = \frac{(60-140) \text{ kHz}}{(1-(-1)) \text{ V}} = -40 \text{ kHz/V}$$



รูปที่ 2.2.3 วงจรแกว่งควบคุมโดยใช้ไดโอดวาร์เรกเตอร์ในวงจรมัลติไวเบเตอร์

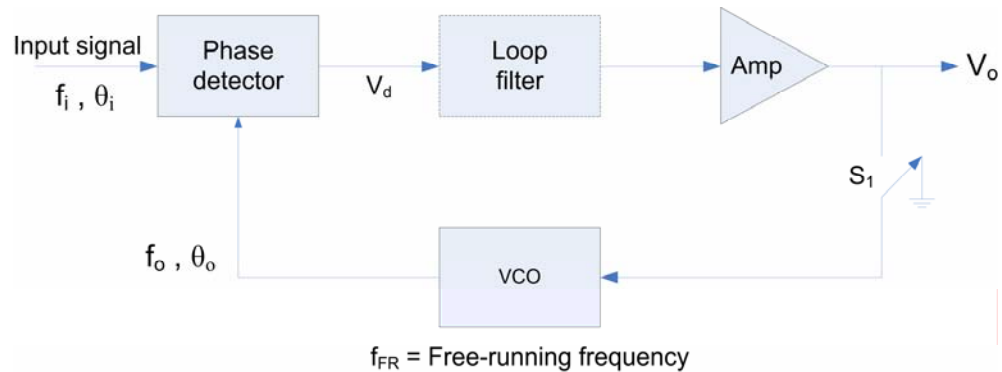


รูปที่ 2.2.4 คุณลักษณะของ VCO

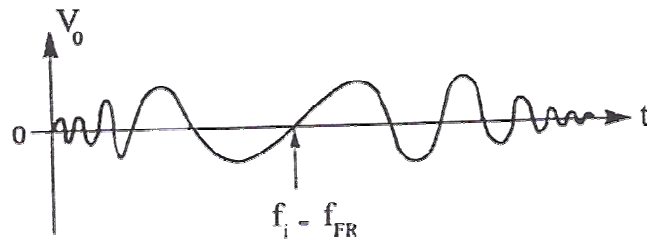
2.3 พฤติกรรมของลูป

2.3.1 การล็อกของลูป

จากรูปที่ 2.3.1 เมื่อสวิตช์ S_1 เปิด และวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ f_i ต่อที่ขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบเฟส เนื่องจาก f_i ไม่เท่ากับค่าความถี่ทำงานเสรี f_{FR} และวงจรเปรียบเทียบเฟสจะให้สัญญาณความถี่ผลรวมและความถี่ผลต่าง โดยมีวงจรกรองของลูป (วงจรกรองผ่านต่ำ) กำจัดความถี่ $(f_i - f_{FR})$, f_i และ f_{FR} เหลือเพียงสัญญาณที่มีความถี่ $f_i - f_{FR}$ ซึ่งเป็นความถี่บีต (Beat frequency) ระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับ VCO ที่สามารถผ่านวงจรกรองไปได้ ความถี่บีตนี้ก็จะถูกขยาย และเห็นเป็นค่า V_o ในออสซิลโลสโคป ถ้าความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณปรับให้ค่า f_i ใกล้เคียงกับ f_{FR} ค่าความถี่ของสัญญาณบีตก็จะลดลงและลดลงไปเรื่อยๆ และถ้าลองปรับความถี่ของสัญญาณขาเข้าอย่างช้าๆ ด้วยปุ่มควบคุมของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ก็จะเห็นแรงดัน V_o บนออสซิลโลสโคปเปลี่ยนแปลงจาก +V ไปเป็น 0 ถึง -V โดยเป็น 0 เมื่อ $f_i = f_{FR}$ คุณลักษณะของวงจรรูปที่ 2.3.2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าด้วยคุณลักษณะของวงจรกรองลูปค่าแอมพลิจูดจะลดลงที่ความถี่สูงๆ ในลักษณะที่ลดลงอย่างราบรื่น โดยสังเกตได้เมื่อค่า $f_i = f_{FR}$



รูปที่ 2.3.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลชันเฟสล็อก



รูปที่ 2.3.2 ความถี่บีตของสัญญาณขาออกที่ \$V_o\$

2.3.2 การได้มา

จากรูปที่ 2.3.1 เมื่อสัญญาณเข้าของสัญญาณของ VCO ต่อดวงกราวด์และวัด \$V_o\$ ได้เท่ากับ 0 แสดงว่า \$f_i = f_{FR}\$ อย่างไรก็ตาม ถ้า \$f_i \neq f_{FR}\$ ดังนั้นจะสังเกตสัญญาณบีตได้ที่ \$V_o\$ เมื่อสวิตช์ปิดค่าสัญญาณความถี่บีตที่ \$V_o\$ จะทำให้ความถี่ของ VCO \$f_o\$ เปลี่ยนแปลงไป ถ้าแรงดันมากพอ (อัตราขยายสูง) และแถบความถี่ของวงจรรองกว้างพอ ดังนั้น VCO ก็จะมีการเบี่ยงเบนจาก \$f_{FR}\$ และเกิดการล็อกในช่วงเวลาที่ \$f_o = f_i\$ ช่วงความถี่เปลี่ยนแปลงที่เปลี่ยนแปลงคือ \$\Delta f = f_i - f_{FR}\$ ส่วนช่วงเวลาที่เกิดการล็อกขึ้นอยู่กับชนิดของลูปและพลวัตของลูป

2.3.3 ลูปล็อก : โหมดของการติดตาม

เมื่อลูปเกิดการล็อกทำให้ทราบว่า \$f_o = f_i\$ และไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่เกิดขึ้นมีเพียงความแตกต่างของเฟสระหว่างสัญญาณและค่า VCO ก็ยังคงมีค่าอยู่ ค่าความแตกต่างของเฟสคือ \$\theta_i - \theta_o = \theta_e\$ จะเรียกกันว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฟสแบบสถิต (Static phase error) โดยที่ค่า \$\theta_e\$ นี้เป็นสัญญาณเข้าของวงจรมอดูเลชันเฟส เมื่อลูปเกิดการล็อกและต้องการให้วงจรมอดูเลชันเฟสสร้าง

แรงดันกระแสตรงเป็น V_d ที่ขออก และเมื่อป้อนผ่านไปยังวงจรรขยายสัญญาณ แรงดัน V_d ก็จะถูกขยายด้วยอัตราขยายของวงจรรขยายซึ่งจะให้ค่าแรงดัน V_o ออกมาทางด้านขาออกของวงจรรขยาย โดยมีขนาดพอที่จะคงให้ความถี่ของ VCO มีค่าเบี่ยงเบนไป Δf ถ้า f_i มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น Δf ก็จะเพิ่มขึ้น และค่า θ_c ต้องเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อที่จะทำให้ได้ V_o มากพอที่จะให้ VCO ยังติดตามความถี่ f_i ได้อยู่จากนิยามของการล็อก คือ $f_o = f_i$ และลูปจะเกิดการติดตามการเปลี่ยนค่า f_i ในแต่ละค่า ถึงแม้มีการคลาดเคลื่อนของ θ_i และ θ_c เกิดขึ้นก็ตาม ดังนั้นจะมี θ_c ซึ่งหาได้จาก $\theta_c = \frac{\Delta f}{k_L}$ จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการเปลี่ยนค่าความถี่ขาออกของ VCO จาก f_{FR} ไปเป็น f_i

2.3.4 อัตราขยายลูปและค่าคลาดเคลื่อนเฟสแบบสถิต

วงจรเฟสล็อกลูปที่เกิดการล็อกแสดงได้ดังรูปที่ 2.3.3 โดยที่วงจรรองจะแสดงได้ด้วยเส้นปะ เพราะว่าสภาวะที่เกิดการสถิตที่คงไว้หรืออยู่นิ่ง และอัตราขยายของวงจรรองเป็นหนึ่งโดยในแต่ละบล็อกของลูปจะมีค่าอัตราขยายของตัวเอง โดยค่า k_ϕ เป็นอัตราขยายของวงจรเปรียบเทียบเฟสมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเรเดียน (V/rad) ของค่าความคลาดเคลื่อนเฟส วงจรรขยายที่มีแถบความถี่กว้างจะมีอัตราขยายแรงดันเป็น k_A โดยมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อโวลต์ (V/V) ดังนั้น $V_o = k_A V_d$

ค่าความถี่ทำงานเสรีของ VCO คือ f_{FR} และความถี่ด้านขาออกของ VCO f_o จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นค่าอัตราขยาย k_o ก็จึงมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ต่อโวลต์ (Hz/V) ที่ตำแหน่งนี้ได้มีการกรองสัญญาณความถี่ f_i , f_o และ $f_i + f_o$ โดยวงจรรองอัตราขยายของลูปสำหรับระบบนี้ก็จะเป็นการคูณของอัตราขยายในแต่ละบล็อกดังนั้นเฟสล็อกลูป

$$k_L = k_\phi k_A k_o$$

โดยที่ k_L มีหน่วยเป็น (V/rad \times V/V \times Hz/V) = Hz/rad

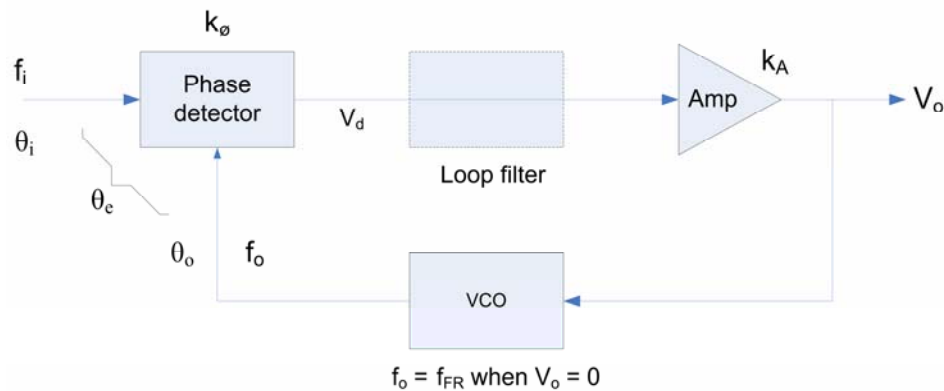
สมมติว่าสัญญาณที่มีความถี่ f_o เป็นสัญญาณขาเข้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบเฟส ในขณะที่ลูปมีการล็อกเกิดขึ้น ถ้าความถี่ก่อนการล็อกคือ $\Delta f = f_i - f_{FR}$ ดังนั้นแรงดันทางด้านขาออกของวงจรรขยายคือ $V_o = \Delta f / k_o$ ซึ่งให้ค่าความถี่ของ VCO เท่ากับ f_i ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบเฟสจะให้แรงดัน $V_d = V_o / k_A = \Delta f / k_o k_A$ และความคลาดเคลื่อนของเฟส $\theta_i - \theta_o = \theta_c = V_d / k_\phi$ จากทั้งหมดรวมกันก็จะได้ว่า $\theta_c = \Delta f / k_o k_A k_\phi = \Delta f / k_L$ หรือ

$$\theta_c = \frac{\Delta f}{k_L}$$

โดยปกติอัตราขยายของลูปจะนิยามเขียนให้อยู่ในรูปของ เรเดียนต่อวินาที (rad/s) มากกว่าที่จะ อยู่ในรูปของเฮิร์ตซ์ต่อเรเดียน (Hz/rad) ดังนั้นจึงแปลงด้วยค่า 2π เรเดียนต่อรอบ และอัตราขยายของ ลูปเขียนใหม่ได้เป็น

$$k_v = 2\pi k_\phi k_A k_o$$

ซึ่งอยู่ในหน่วยวินาที⁻¹ หรือเรเดียนต่อวินาที (rad/s)



รูปที่ 2.3.3 วงจรเฟสล็อกลูปในช่วงของโหมดการติดตาม

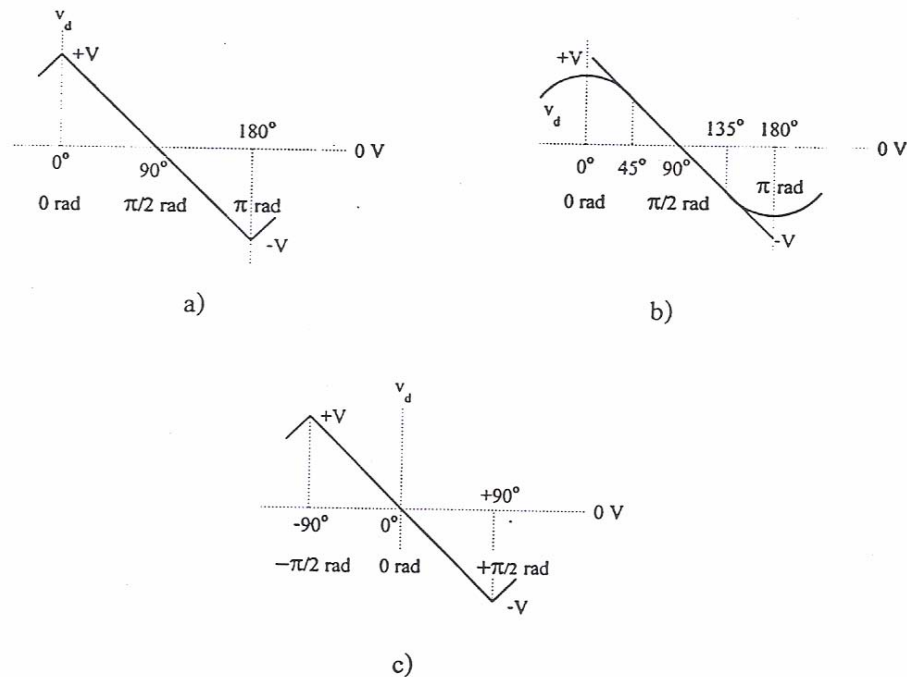
2.3.5 ช่วงในการคงค่าไว้

ช่วงความถี่ของความถี่สำหรับสัญญาณ f_i ที่ลูปยังคงรักษาการล็อกไว้เรียกว่า ช่วงในการคงค่าไว้ (Hold in range) สมมติว่าวงจรขยายไม่มีการอิมิตัวและ VCO มีช่วงความถี่ที่กว้าง ด้วยคุณลักษณะของวงจรเปรียบเทียบเฟสก็จะจำกัดช่วงของการคงค่าเอาไว้ จะเห็นได้ชัดว่าคุณลักษณะดังรูปที่ 2.3.4 ค่าความคลาดเคลื่อนเฟสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก f_i เพิ่มขึ้น ค่าขอบเขตของ V_d จะน้อยกว่าแรงดันของ VCO ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบเฟสจึงไม่สามารถให้ค่ามากกว่า V โวลต์ได้ ช่วงทั้งหมดของ V_d คือ $\pm V = 2V$ ดังนั้นค่า θ_c จึงมีช่วงทั้งหมดเป็น π เรเดียน จาก $\theta_c = \frac{\Delta f}{k_L}$ ช่วงที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของความถี่ในสัญญาณขาเข้า คือ $\Delta f_H = f_i(\max) - f_{FR}(\min)$ ซึ่งหาค่าได้เป็น

$$\Delta f_H = \pi k_L$$

หรือ

$$\Delta f_H = \frac{k_v}{2}$$



รูปที่ 2.3.4 แรงดันขาออกของวงจรเปรียบเทียบเฟส (V_d) กับค่าคลาดเคลื่อนเฟส (θ_c)

- เมื่อป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขาเข้า
- เมื่อป้อนสัญญาณไซน์ซอซด์
- เมื่อป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขาเข้าเทียบกับจุดอ้างอิงไบอัสของเฟส

2.4 ผลตอบสนองความถี่ของลูปและแถบความถี่

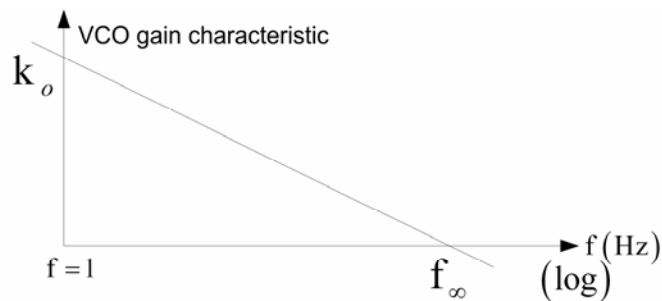
ในหัวข้อที่ผ่านมาได้พิจารณาถึงพฤติกรรมในสถานะอยู่ตัวของวงจรเฟสล็อกลูปและได้อธิบายองค์ประกอบในลูปแล้ว สำหรับหัวข้อนี้จะมาทำความเข้าใจถึงผลตอบสนองความถี่และแถบความถี่ในสถานะของลูปเกิดการล็อกเพื่อนำไปใช้งานในการดีมอดคูเลต FM

2.4.1 ผลตอบสนองความถี่ขององค์ประกอบในลูป

องค์ประกอบต่างๆในลูปที่ได้อธิบายไปแล้วนั้นส่วนใหญ่มักจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสัญญาณกระแสตรง ยกเว้นสัญญาณขาเข้าของวงจรเปรียบเทียบเฟสและสัญญาณขาออกของ VCO แถบความถี่ของวงจรเปรียบเทียบเฟสที่ออกแบบได้คตินั้นจะต้องกว้างมากพอ โดยวงจรเปรียบเทียบเฟสที่มีอยู่นั้นจะให้แถบความถี่สูงเกิน 500 MHz แต่แถบความถี่ของลูปจริง ๆ นั้นจะถูกจำกัดด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ R_0C ที่อยู่ทางด้านออกของวงจรเปรียบเทียบเฟสเพื่อใช้ในการกำจัดสัญญาณความถี่ f_i , f_0 และ $f_i + f_0$

ดังนั้นความถี่คัตออฟ (Cut-off frequency) ที่หาจาก R_oC จะต้องออกแบบให้มีค่ามากกว่าแถบความถี่ของรูป แถบความถี่ของวงจรถยายในรูปจะต้องมีค่ากว้างกว่าแถบความถี่ของรูป โดยปกติออปแอมป์ 741 จะมีแถบความถี่ในช่วง 2 MHz เหตุผลที่ว่าใช้วงจรเปรียบเทียบเฟสที่มีแถบความถี่กว้างและวงจรถยายที่มีความถี่กว้างเพื่อควมมีเสถียรภาพที่ดี ในแต่ละส่วนที่เป็นความถี่หักมุมสูง (High-frequency corner) (ค่าคงที่เวลา RC หรือบางครั้งเราเรียกว่าโพล) จะสามารถเพิ่มเฟสที่ป้อนกลับแบบลบให้มีการประวิงได้ถึง 90° ยิ่งไปกว่านั้นโพลแต่ละโพลที่ใกล้แถบความถี่ของรูปสามารถเพิ่มลำดับของรูปได้ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป ผลตอบสนองความถี่ VCO เป็นส่วนประกอบแรกที่ยำกัลดแถบความถี่ของรูป จากการศึกษาในหัวข้อ VCO ที่ใช้ในการมอดูเลต FM นั้น เป็นที่ทราบกันดีว่าดัชนีการมอดูเลตจะแปรผกผันกับความถี่ที่แปรเปลี่ยนกับแรงดันขาเข้า (f_m) โดย $m_f \propto 1/f_m$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงแบบไซน์ซออยด์ของสัญญาณขาเข้า VCO; $V_o(t)$ อัตราขยายรูปจะลดลงตามความถี่ $V_o(t)$ ที่เพิ่มขึ้น อัตราขยายของรูปจะลดลงตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยลักษณะเช่นนี้จะมีผลตอบสนองความถี่เช่นเดียวกับวงจรถยายอินทิเกรต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4.1 และหาอนุพันธ์ของ VCO ได้โดยการผ่านวงจรถยายอินทิเกรตในวงจรเฟสล็อกสัญญาณไซน์ซออยด์ขาออกของ VCO ซึ่งเขียนได้เป็น

$$e(t) = E \sin[\theta_o(t)]$$



รูปที่ 2.4.1 ผลตอบสนองความถี่ของอัตราขยาย VCO $k_o(f)$

โดยที่ $\theta_o(t)$ เป็นค่าเฟสในช่วงเวลาที่เวลา t ใดๆ ความถี่ของ VCO ช่วงขณะใดๆคืออัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสนั้นคือ

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_o(t)}{dt}$$

เนื่องจากวัดความถี่ VCO และเปลี่ยนแปลงค่า V_o ที่มาควบคุม สามารถหาค่าเฟส VCO ที่แปรตาม V_o จะสังเกตได้ว่า $d\theta_o(t) = 2\pi f_o dt$ ด้วยการอินทิเกรตทั้งสองจะได้

$$\theta_o = 2\pi \int f_o dt$$

ถ้าความถี่คงที่ ดังนั้นค่าอินทิกรัลก็จะหาได้ง่าย

$$\theta_o(t) = 2\pi f_o t + \theta_o$$

โดย θ เกิดจากค่าคงที่ที่ได้จากการอินทิเกรตโดยแทนค่าออฟเซตของเฟสที่ $t = 0$ ขาออกของ VCO ก็จะกลายเป็น

$$e(t) = E \sin(2\pi f_o t + \theta_o)$$

ถ้าความถี่ VCO เปลี่ยนเนื่องจากการเปลี่ยนขาเข้าที่จะควบคุม $V_o(t)$ ดังนั้นคุณลักษณะของ VCO จึงเส้นมีอัตราเป็น

$$\Delta f_o = k_o V_o(t)$$

และความถี่ชั่วขณะคือ

$$f(t) = f_o + k_o V_o(t)$$

เฟสของ VCO ในชั่วขณะคือ

$$\theta_o(t) = 2\pi f_o t + 2\pi k_o \int V_o(t) dt + \theta_o$$

ในพจน์ของพฤติกรรมของเฟสล็อกถูปล จะเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนเฟสของ VCO คือพจน์ที่เกิดจากการอินทิเกรตของรูป $V_o(t)$ ถ้า

$$V_o(t) = V_o \cos 2\pi f t$$

ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนของ $\Theta_o(t)$ คือ

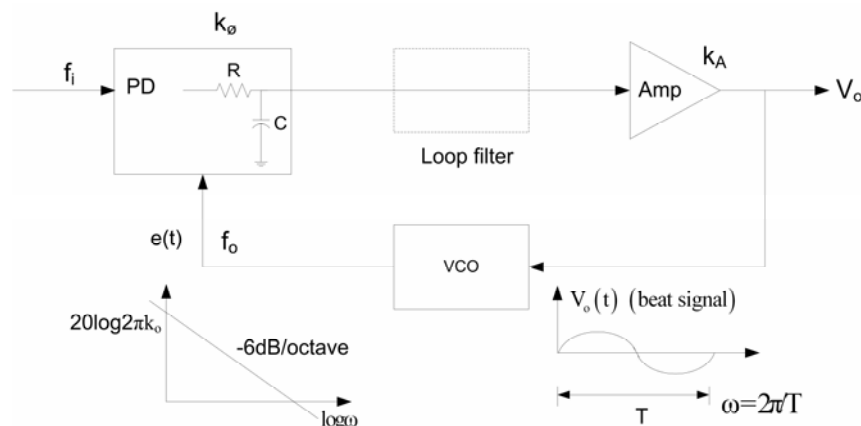
$$2\pi k_o \int V_o \cos 2\pi f t dt = \left(\frac{k_o}{f} \right) V_o \cos 2\pi f t = \left(\frac{k_o}{f} \right) V_o(t) \angle -90^\circ$$

เห็นได้ว่าความสามารถของ VCO ในการควบคุมผลตอบสนองของเฟสลูปจะแปรผกผันกับกับความถี่ของ V_o และมีการตามกันอยู่ 90° ทุกๆความถี่ซึ่งแสดงเป็นการอินทิเกรต (โพลที่ $f = 0$) นั่นเอง ผลตอบสนองความถี่ของลูปลแสดงได้ดังรูปที่ 2.4.1 โดยอัตราขยายตามทฤษฎีจะเป็นอนันต์ที่ $f = 0$ แต่ k_o ที่ $f = 1 \text{ Hz}$ ที่ $\omega = 1 \text{ rad/s}$

2.4.2 ผลตอบสนองระบบเฟสล็อกถูปล

ในหัวข้อที่ผ่านมา ผลตอบสนองความถี่ในแต่ละองค์ประกอบของลูปลได้อธิบายไปแล้ว ยกเว้น วงจรกรองที่ใช้ในการชดเชยลูปล (ดูรูปที่ 2.4.2) วงจรเปรียบเทียบกับเฟสจะเป็นวงจรแถบกว้างที่มี

ความสัมพันธ์กับความถี่ (อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในช่วงเวลาใดๆ) ภายในลูป ความถี่ที่ตัดออกพบได้จากความต้านทานขาออกและตัวเก็บประจุบายพาส ความถี่ที่ตัดออกพื้จะมีค่าสูงสำหรับกรณีที่มีความถี่ VCO สูงๆ โดยสถานะเช่นนี้ผลตอบสนองความถี่ของลูปจะถูกจำกัดโดย VCO และผลของวงจรมินทิเกรต สำหรับเฟสล็อกกลูบที่ไม่มีวงจรรองที่ชดเชย ผลตอบสนองความถี่ของลูปเปิดจะหาได้จากผลคูณของผลตอบสนองในแต่ละองค์ประกอบ



รูปที่ 2.4.2 เฟสล็อกกลูบที่ยังไม่มีวงจรรองสำหรับชดเชยลูป

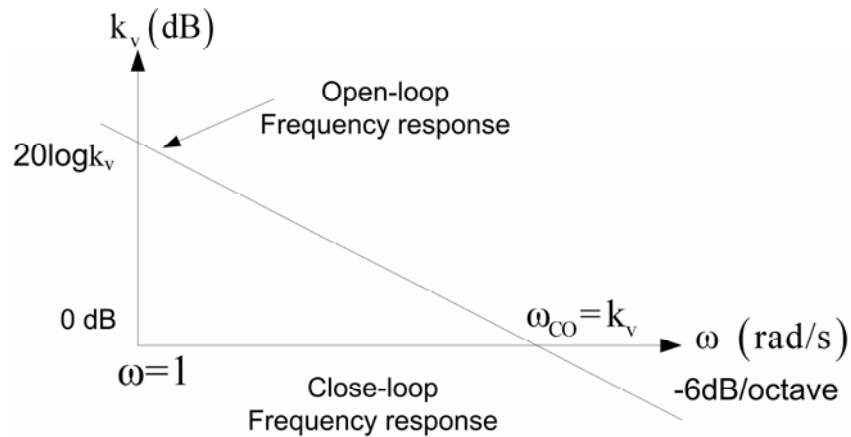
อัตราขยายของลูปในหน่วยเดซิเบลจะได้มาจาก $2\pi k_o k_A k_v$ ที่ $\omega = 1 \text{ rad/s}$ และอัตราขยายของลูปจะลดลงด้วยอัตรา $1/\omega$ นั่นคือ -6 dB/octave (-20 dB/decade) ดังนั้นอัตราขยายลูปจะเป็น 0 dB ($k_v = 1$) ที่ความถี่เป็น $k_v \text{ rad/s}$ ความถี่ที่ทำให้อัตราขยายเป็น 0 dB จะเรียกว่าความถี่ตัดข้ามของลูป (Loop crossover frequency, ω_{CO}) ในกรณีที่ลูปไม่มีการชดเชย ความถี่ตัดข้ามนี้จะมีค่าเท่ากับ k_v นั่นคือ $\omega_{CO} = k_v$

2.4.3 ผลตอบสนองความถี่ของลูปเปิด และแถบความถี่

กราฟโบคของลูปปิดสำหรับกรณีวงจรมินทิเกรตที่ไม่มีวงจรรองสามารถแสดงได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4.3 สังเกตได้ว่าเมื่อระบบทำงานในลูปปิด อัตราขยายของระบบจะเป็น 1 (0 dB) จนถึงความถี่เข้าใกล้ ω_{CO} หลังจากความถี่นี้จะลดลงด้วยอัตราลูปเปิดนั่นคือ 6 dB/octave

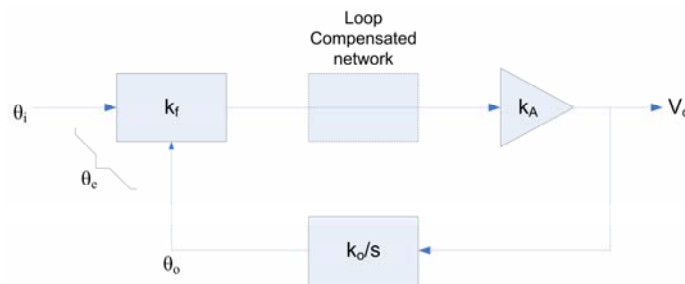
สำหรับความถี่สูงๆของสัญญาณในลูปดังนั้นระบบเฟสล็อกกลูบที่ไม่มีวงจรรอง โดยสามารถหาแถบความถี่ได้จาก

$$BW = \omega_{CO} = k_v$$



รูปที่ 2.4.3 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรมีการชดเชย

แถบความถี่ที่หาได้จาก $BW = \omega_{CO} = k_v$ เป็นแถบความถี่ด้านเดียวเนื่องจากวงจรมีการชดเชย สามารถติดตามความถี่ของสัญญาณที่สูงกว่าและต่ำกว่า f_{FR} ของ VCO รูปกราฟโบลอของวงจรมีการชดเชยที่ไม่น่าจะมีการชดเชยต่อค่าเบี่ยงเบนความถี่เข้าที่เห็นจะมีลักษณะเหมือนวงจรกรองผ่านต่ำ วงจรมีการชดเชยที่ใช้นี้เป็นวงจรสำหรับติดตาม (Tracking filter) โดยมี VCO ที่ติดตามค่าเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณขาเข้า f_i และค่าเบี่ยงเบนของความถี่ขาเข้าเหล่านี้จะให้ค่า V_o ที่แปรเปลี่ยนไปกับความถี่ของสัญญาณภายใน ω



รูปที่ 2.4.4 วงจรมีการชดเชย

จากรูปที่ 2.4.4 ถ้ากำหนดเฟสขาเข้าคือ θ_i และเฟสขาเข้าของ VCO คือ θ_o และค่าคลาดเคลื่อนเฟสคือ $\theta_e = \theta_i - \theta_o$ เป็นสัญญาณขาเข้าที่ไปยังวงจรมีการชดเชยและจากนี้จะได้ $\theta_i = \theta_e + \theta_o$ โดยพิจารณาในทิศที่กลับทางของรูปจาก θ_o จะเห็นได้ว่า $\theta_o = (2\pi k_o/s)V_o$ และ $V_o = k_A k_\phi \theta_e$ ดังนั้น $\theta_o = (2\pi k_o/s)k_A k_\phi \theta_e$ เมื่อนำมาแทนค่าใน $\theta_i = \theta_e + \theta_o$ ดังนั้นจะได้ $\theta_i = \theta_e + [(2\pi k_o k_A k_\phi)/s]\theta_e$

หรือ $\theta_i = [1 + (2\pi k_o k_A k_\phi)/s] \theta_e$ เพื่อหาว่าแรงดันขาออก V_o มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเฟสขาเข้าได้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ $V_o = k_A k_\phi \theta_e$ ซึ่งจะได้ $\theta_i = [1 + (2\pi k_o k_A k_\phi)/s] [V_o / k_A k_\phi]$ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณขาออก / สัญญาณขาเข้า คือ V_o / θ_i จึงมีค่าเป็น

$$\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{sk_\phi k_A}{s + 2\pi k_o k_A k_\phi}$$

สำหรับเฟสล็อกูปที่ไม่มีการชดเชย ผลตอบสนองความถี่และลักษณะผลตอบสนองชั่วคราวของเฟสล็อกูป หาได้จากโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนโดยการให้ส่วนของ $\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{sk_\phi k_A}{s + 2\pi k_o k_A k_\phi}$ เป็น 0 โดยตัวส่วนจะเป็นศูนย์เมื่อ $s = -2\pi k_o k_A k_\phi = -k_v$

$$\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{sk_\phi k_A}{s + k_v}$$

จากสมการข้างบนนี้ แสดงได้ว่าผลตอบสนองชั่วคราวที่มีลักษณะเหมือนกับวงจรกรองผ่านสูง RC นั่นคือ $V_o/V_i = (sRC)/(sRC+1) = s/(s + \omega_c)$ โดย $\omega_c = 1/RC$ ซึ่งเป็นความถี่คัตออฟในหน่วยเรเดียน/วินาที (rad/s) สำหรับกรณีที่ความถี่ของสัญญาณขาเข้าเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะได้ผลตอบสนองเฟสล็อกูปที่มีลักษณะคล้ายวงจรกรองผ่านต่ำ เพราะจาก $\omega = d\theta/dt$, $\omega_i = s\theta_i$ และ $f_i = (1/RC)s\theta_i$ จะได้ $V_o/\theta_i = V_o/[(2\pi f_i)/s] = (sV_o)/(2\pi f_i)$ ดังนั้น

$$\frac{V_o}{f_i} = \frac{2\pi k_\phi k_A}{s + k_v}$$

แสดงได้ว่าการเปลี่ยนแปลง V_o ไปกับ f_i จะมีผลตอบสนองที่เหมือนกับวงจรกรองผ่านต่ำ RC โดย $V_o/V_i = 1/(sRC+1) = \omega_c/(s + \omega_c)$ โดย $\omega_c = 1/RC$ คือความถี่หักมุมใน rad/s แถบความถี่ของเฟสล็อกูปที่ไม่มีการชดเชยคือ $\omega = k_v$ และเฟสล็อกูปจะมีผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) ที่คล้ายกับผลตอบสนองชั่วคราวของวงจรกรองผ่านต่ำ นั่นคือจะเหมือนกับการอัดประจุของตัวเก็บประจุ เมื่อสัญญาณขาเข้าเฟสล็อกูปเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได ถ้าให้ f_i มีค่าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันไดเป็น Δf ที่ $t = 0$ ดังนั้น $F_i(s) = \Delta f/s$ ด้วยการแก้แรงดันขาออกจากสมการ $V_o/f_i = (2\pi k_\phi k_A)/(s + k_v)$ และ $2\pi k_\phi k_A = k_v/k_o$ ได้ผลเป็น

$$V_o(S) = \frac{\Delta f k_v / k_o}{s(s + k_v)}$$

เมื่อทำการแปลงผังกลับของสมการข้างบนนี้จะได้ผลตอบสนองเวลาของ V_o กรณีสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นบันไดคือ

$$V_o(t) = \left(\frac{\Delta f}{k_o} \right) (1 - e^{-k_v t})$$

ซึ่งจะช่วงเวลาขึ้นเป็น $1/k_v$ และค่าสภาวะอยู่ตัวเป็น $V_o(ss) = \Delta f/k_o$ และแรงดันขาออกจะเข้าสู่ค่าสถานะอยู่ตัวช้าซึ่งไม่ดีต่อการมอดูเลตสัญญาณ FSK ดังนั้นจึงต้องมีวงจรชดเชยเพื่อให้เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วสำหรับเฟสล็อกกลุ่ที่ไม่มีวงจรชดเชยจะได้แถบความถี่ของรูปเป็น k_v ซึ่งจะมีผลตอบสนองกับการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณเข้าเหมือนกับวงจรกรองผ่านต่ำ RC และสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราขยายรูปปิดกับความถี่เป็น

$$k_{CL} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_{CO}}$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันขาออกต่อความถี่ขาเข้าที่หามาได้นั้นคือ

$$\frac{V_o}{f_i} = \frac{2\pi k_\phi k_A}{j\omega + k_\phi k_A k_o} = \frac{2\pi k_\phi k_A / k_\phi k_A k_o}{\frac{j\omega}{k_v} + 1} = \frac{2\pi/k_o}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{CO}}}$$

โดย $\omega_{CO} = k_v$ และ f_i คือความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์ขาเข้า โดย ω คือความถี่ที่มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที (rad/s) ของด้านออกของวงจรเปรียบเทียบกับเฟส (สัญญาณคีมอดูเลต)

2.5 การประยุกต์ใช้งานคีมอดูเลตของเฟสล็อกกลุ่

เมื่อเฟสล็อกกลุ่เกิดการล็อกกับสัญญาณขาเข้า VCO ก็จะคอยติดตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณขาเข้า f_i อย่างช้าๆ สมมติว่า f_i มีการเพิ่มขึ้นไปเท่ากับ Δf_i เพื่อให้รูปยังคงมีการล็อกค่าอยู่ได้ ($f_o = f_i$) แรงดัน VCO จะมีการเพิ่มเป็น $\Delta V_o = \Delta f_i/k_o$ การเปลี่ยนแรงดันจะเป็นการเปลี่ยนค่าแรงดัน V_d ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเฟสเป็น $\Delta\theta_e = 2\pi\Delta f_i/k_v$ สมมติว่าสัญญาณ FM ที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น f_i ถูกมอดูเลตด้วยค่าดัชนี $m_f = 4$ กับสัญญาณไชนูซอยด์ 1kHz จากที่ทราบว่าความถี่ของคลื่นพาห์นั้นจะมีการเบี่ยงเบนที่มากกว่าและน้อยกว่าค่าของความถี่ f_i ด้วยปริมาณ $f_i = m_f f_m = 4 \times 1 \text{ kHz} = 4 \text{ kHz}$ pk ถ้าสัญญาณ FM นี้เป็นสัญญาณขาเข้าของเฟสล็อกกลุ่โดยมีอัตราขยาย VCO เป็น $k_o = 10 \text{ kHz/V}$ และแถบความถี่ของรูปมากกว่า 1kHz ดังนั้นแรงดันเข้า VCO จะเป็นสัญญาณที่ 1kHz ที่มีค่ายอดเป็น $\Delta V_o = \Delta f_i/k_o = (4 \text{ kHz})/(10 \text{ kHz/V}) = 400 \text{ mV}$ pk สัญญาณไชนูซอยด์ 400 mV (peak) และอยู่เป็นค่ากลางของแรงดันที่หาจากค่าต่างกันของความถี่ที่ทำงานเสรี f_{FR} และสัญญาณคลื่นพาห์ของสัญญาณขาเข้า f_i จาก $\Delta V_o = (f_i - f_{FR})/k_o$ และต้องระมัดระวังว่าค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของความถี่จะต้องมีค่าไม่เกินช่วงคงค่าไว้ (Hold-in-range) ของรูปซึ่งจะไม่ทำให้เกิด

การลือกขึ้นและเกิดการสลป จากลักษณะของวงจรเปรียบเทียบเฟสจะมีค่าซ้ำกันทุกๆ 2π เรเดียน ลูปก็ จะไม่มีการลือกในช่วง $\pi/2 < \theta_0 < 3\pi/2$ เพราะในลูปจะมีเฟสผิดไป เมื่อลูปยกเลิการลือกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงชั่วครู่ ระบบจะมีการเลื่อนไปเป็นหนึ่งรอบหรือมากกว่าก่อนจะลือกอีกครั้งในโหมค เสถียรภาพ ถ้าอัตราการมอดคูเลต f_m มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัญญาณขาออกที่ดิมมอดคูเลตจากเฟสลือกลูปก็ จะลดทอนลง และจะมีค่าเลื่อนเฟสซึ่งมีผลตอบสนองเช่นเดียวกับวงจรรองผ่านต่ำ $f_{CO} = k_v/2\pi$ ใน สัญญาณ FSK ค่าความถี่ของสัญญาณพาหะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นบันไดโดยเปลี่ยนจาก f_s เรียกว่าสเปซ(Space)ไปเป็น f_M เรียกว่ามาร์ก(Mark) โดย f_s จะมีค่าความถี่ที่สูงกว่า f_M และจะส่งค่า ดิจิตอลเป็น 0 อัตราสัญญาณคลื่นพาหะจะมีการสวิตช์อยู่ระหว่าง f_s และ f_M ซึ่งเป็นอัตราข้อมูลในทาง ดิจิตอล (บิต/วินาที) ซึ่งอ้างเป็นอัตราโบด์ (Baud rate) เฟสลือกลูปสามารถใช้ในการมอดคูเลตเชิงเลข FSK และดิมมอดคูเลตของFSK ซึ่งได้นำมาใช้ในโหมคได้อีกด้วย

สำหรับเฟสลือกลูปที่ไม่มีการชดเชยก็จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับวงจรรองผ่านต่ำโดยมี ผลตอบสนองขึ้นบัน ไดของความถี่ขาเข้าเหมือนวงจรรองผ่านต่ำ สัญญาณ FSK ที่มีอัตราโบด์ต่ำๆ จะ ดิมมอดคูเลตด้วยเฟสลือกลูปได้ง่ายและแม่นยำกว่า เพราะว่าลูปมีผลตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงแบบ ขึ้นบัน ไดของความถี่สัญญาณพาหะ ค่าคงที่เวลาสำหรับแรงดัน V_0 ก็จะเป็น

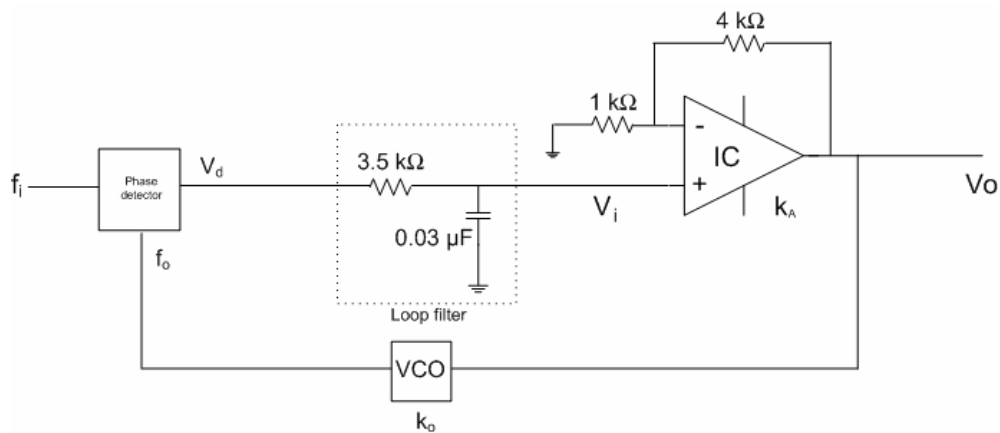
$$\tau = \frac{1}{\omega_{CO}} = \frac{1}{k_v} \quad (\text{หน่วยเป็นวินาที})$$

2.6 การปรับปรุงผลตอบสนองของลูป

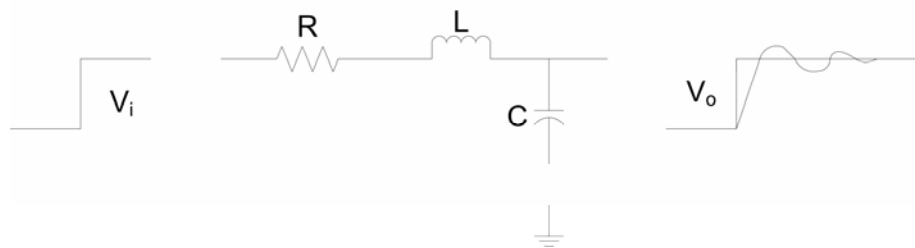
ผลจากการดิมมอดคูเลต FSK แสดงให้เห็นว่าข้อเสียของเฟสลือกลูปที่ไม่มีการชดเชยคือมี ผลตอบสนองที่เหมือนกับผลตอบสนองวงจรรองผ่านต่ำดังนั้นในการประยุกต์หลายๆอย่างรวมทั้งการ ดิมมอดคูเลตสัญญาณ FSK ลูปที่ไม่มีการชดเชยจะมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ของความถี่ขาเข้า (ผลตอบสนองขึ้นบันได) ที่ให้ค่า V_0 ซ้ำเกินไป ผลตอบสนองลูปสามารถปรับปรุง ให้ดีขึ้นเพื่อให้ค่า V_0 ทำให้ใช้เวลาขาขึ้นน้อยกว่าเดิมได้ด้วยการนำวงจรชดเชยลูป (Loop compensation) เทคนิคที่ง่ายที่สุดสำหรับการชดเชยเฟสลือกลูปคือการใส่วงจรประวิงเฟส (Phase-delay network) ลงในลูป เฟสลือกลูปดังแสดงในรูปที่ 2.6.1 แสดงถึงวงจรถ้าหลัง RC (RC lag network) ที่ต่อ อยู่ระหว่างวงจรเปรียบเทียบเฟสและวงจรรขยาย ค่าเวลาคงที่ RC สามารถเลือกให้ผลตอบสนองลูปได้ อย่างเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ของระบบใดๆ ผลของการใส่วงจรถ้าหลัง RC ลงในลูปป้อนกลับ แบบลบที่มีวงจรถ้าหลังใน VCO อยู่แล้วจะทำให้เป็นระบบลำดับที่ 2 ได้ ผลตอบสนองในเวลาจะ

แสดงได้ดังรูปที่ 2.6.2 วงจรจะประกอบด้วยวงจร RC ลำดับที่ 1 ที่อนุกรมกับค่าเหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้เป็นระบบลำดับที่ 2 ได้ ถ้า R มีขนาดใหญ่มากเกินไป วงจรก็จะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมที่ $f_0 = 1/2\pi\sqrt{RC}$ ซึ่งจะเรียกกันว่าความถี่ธรรมชาติหน่วงขาด(Under damped natural frequency) ดังแสดงในรูปที่ 2.5.1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันทันทีทันใดจะทำให้ V_o ที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าในช่วงเริ่มต้นให้กลับมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนพุ่งสูงเกิน (Overshooting) และสั่นแบบหน่วง (Ringing) การสั่นแบบหน่วงจะเกิดการหน่วงหลังจากเวลาที่คำนวณได้จากค่า Q โดยที่ค่าของ $Q = 2\pi f_0 L/R$ ในระบบลำดับที่ 2 จะมีปัจจัยหนึ่งๆที่เรียกกันว่าตัวประกอบหน่วง (Damping factor) โดยหาได้จาก

$$\delta = \frac{1}{2Q}$$



รูปที่ 2.6.1 เฟสล็อกคูลูปที่มีการชดเชยด้วย RC



รูปที่ 2.6.2 ผลตอบสนองขั้นบันไดของ RLC ลำดับที่ 2 แบบหน่วงขาด

ถ้า R มีขนาดมากที่ทำให้ $\delta > 1$ จะไม่มีการสั่นแบบหน่วงเกินขึ้นแต่ค่าเวลาขาขึ้นจะแยกว่ากรณีวงจรลำดับที่ 1 ซึ่งเรียกระบบนี้ว่าระบบหน่วงเกิน (Over damped system) และถ้า $\delta = 1$ จะเรียกว่าระบบหน่วงวิกฤต (Critical damped system) ระบบป้อนกลับแบบลำดับที่ 2 อย่างเฟสล็อกูปที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6.1 จะต้องออกแบบให้ได้ผลตอบสนองทางพลวัตที่เหมาะสมเพื่อให้ทันกับสัญญาณเข้าที่เข้าอย่างทันทีทันใด สำหรับตัวอย่างวงจรคิมอดคูลตสัญญาณ FSK แบบหน่วงขาดจะเกิดการพุ่งสูงเกิน (Overshooting) ค่าแรงดันที่ต้องการได้และเกิดการสั่นแบบหน่วง ถ้าเลือกค่า R และ C อย่างเหมาะสมจะทำให้เฟสล็อกูปที่ได้ชดเชยแล้วจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วขึ้นและไม่มีการสั่นหน่วงเกิดขึ้นด้วย

สำหรับเฟสล็อกูปลำดับที่ 2 ที่ชดเชยด้วยวงจรชดเชยแบบเฟสล่าหลังที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ $F(s) = \omega_c / (s + \omega_c)$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6.1 เป็นวงจรอินทิเกรต RC ผลที่ได้จะเกิดเป็นระบบลำดับที่ 2 และเฟสสามารถควบคุมได้ ดังนั้นสามารถควบคุมค่าเวลาขาขึ้นและลักษณะผลตอบสนองในเวลาของลูปได้ด้วย ผลตอบสนองความถี่สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันกับกรณีที่ไม่มีการใส่วงจรชดเชย ซึ่ง

ผลตอบสนองจากสมการ $\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{sk_\phi k_A}{s + 2\pi k_o k_A k_\phi}$ ก็จะเป็น

$$\frac{V_o}{\theta_i} = \frac{sk_\phi k_A F(s)}{s + 2\pi k_o k_A F(s)}$$

และจากสมการ $\frac{V_o}{f_i} = \frac{2\pi k_\phi k_A}{s + k_v}$ ก็จะเป็น

$$\frac{V_o}{f_i} = \frac{2\pi k_\phi k_A F(s)}{s + k_v F(s)}$$

เนื่องจาก $F(s) = \omega_c / (s + \omega_c)$ สำหรับกรณีของการชดเชยแบบเฟสล่าหลังโดยสมการ

$V_o(S) = \frac{\Delta f k_v / k_o}{s(s + k_v)}$ สำหรับความถี่ของสัญญาณเข้าแบบขั้นบันไดคือ

$$V_o = \frac{\Delta f k_v \omega_c / k_o}{s(s^2 + \omega_c s + k_v \omega_c)}$$

โดยเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความถี่ของระบบลำดับที่ 2 ทั่วไป

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

เมื่อทำการแปลงผกผันลาปราช จะได้ผลตอบสนองเชิงเวลาเป็น

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\delta\omega_n t}}{\sqrt{1-\delta^2}} \sin\left[\omega_n t \sqrt{1-\delta^2} + \theta\right]$$

โดยที่ $\theta = \tan^{-1} \sqrt{(1/\delta^2)-1}$

เมื่อเปรียบเทียบกับกันจะได้

$$\omega_n^2 = k_v \omega_c$$

และ

$$\delta = \frac{\omega_c}{2\omega_n} = \frac{\omega_c}{2\sqrt{k_v \omega_c}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_c}{k_v}}$$

เราสามารถเขียนสมการ $V_o = \frac{\Delta f k_v \omega_c / k_o}{s(s^2 + \omega_c s + k_v \omega_c)}$ ใหม่ได้เป็น

$$V_o(s) = \frac{(\Delta f / k_o) \omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

ดังนั้นผลตอบสนองเชิงเวลาที่มีการชดเชยคือ

$$V_o(t) = \frac{\Delta f}{k_o} \left\{ 1 - \frac{e^{-\delta\omega_n t}}{\sqrt{1-\delta^2}} \sin\left[\omega_n t \sqrt{1-\delta^2} + \theta\right] \right\}$$

โดยที่

$$\frac{\Delta f}{k_o} = V_o(ss)$$

เป็นสภาวะอยู่ตัวแล้ว สำหรับ $0 < \delta < 1$ เฟสล็กู๊ป ที่มีการชดเชยจะมีผลตอบสนอง
ขั้นบันไดเหมือนระบบลำดับที่ 2 แบบหน่วงขาด จากสมการ $H(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2)}$ แทน

$s = j\omega$ จะหาค่าสูงสุดได้เป็น

$$\frac{1}{2\delta\sqrt{1-\delta^2}}$$

ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เกิดจากการนอร์มอลไลซ์และความถี่ที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-2\delta^2}$$

2.7 วงจรสังเคราะห์ความถี่

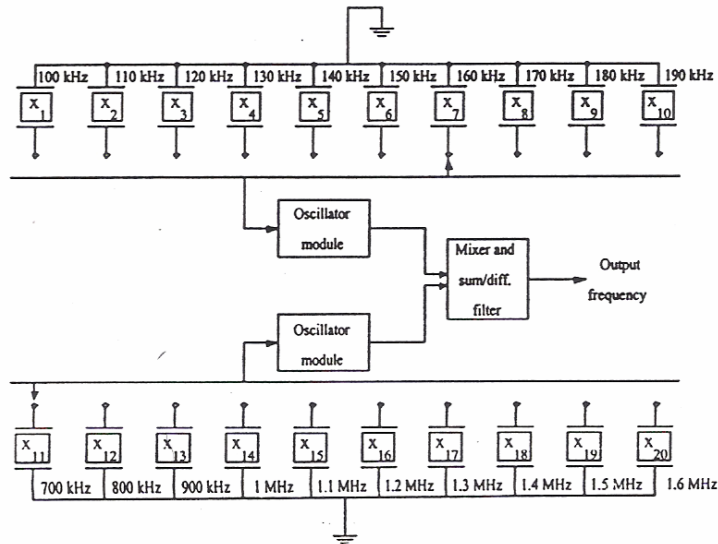
วงจรสังเคราะห์ความถี่(Frequency synthesizer) เป็นวงจรแวก์ที่แปรความถี่ได้ด้วยการมีเสถียรภาพที่ถูกควบคุมด้วยคริสตัล วงจรสังเคราะห์ความถี่ใช้ในเครื่องมือวัด อุปกรณ์ที่ทดสอบอัตโนมัติและระบบสื่อสาร รวมไปถึงการใช้งานที่พบเห็นทั่วไปเช่นระบบการเลือกช่องของโทรทัศน์ เครื่องรับส่งวิทยุสมัครเล่น วิทยุที่มีแถบความถี่สำหรับประชาชน และเครื่องสแกน นอกจากนี้วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้ในการเชื่อมโยงของระบบสื่อสารหลายๆของสัญญาณสำหรับสร้างความถี่คลื่นพาที่เสถียรในเครื่องส่งวิทยุ และยังสร้างสัญญาณความถี่โลคัลที่เสถียรในเครื่องรับวิทยุ

วิธีการสังเคราะห์ความถี่จะสามารถทำได้ 2 วิธีคือการสังเคราะห์ความถี่ทางตรง(Direct frequency synthesizer) กับการสังเคราะห์ความถี่ทางอ้อม (Indirect frequency synthesizer) สำหรับการสังเคราะห์ความถี่ทางตรงนั้นเป็นการเพิ่มสัญญาณความถี่ขาออกด้วยการผสมสัญญาณขาออกที่มาจากแหล่งกำเนิดความถี่แบบควบคุมด้วยผลึก (Crystal-controlled frequency synthesizer) 2 แหล่งหรือมากกว่า หรือโดยการหาร หรือการคูณความถี่ขาออกด้วยวงจรแวก์คริสตัล (Single-crystal oscillator) วงจรเดียวกันได้ สำหรับการสังเคราะห์ความถี่ทางอ้อมเป็นการนำวงจรคูณความถี่หรือวงจรหารความถี่แบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback-controlled divider/multiplier) อย่างเช่นเฟสล็อกกลูปมาใช้ในการเพิ่มความถี่ขาออก แต่วิธีการดังกล่าวนี้จะทำงานช้า และไวต่อสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามราคาจะถูกกว่า และวงจรรองความถี่ที่มีจำนวนและความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการสังเคราะห์ความถี่ทางตรง

2.7.1 การสังเคราะห์ความถี่ทางตรง

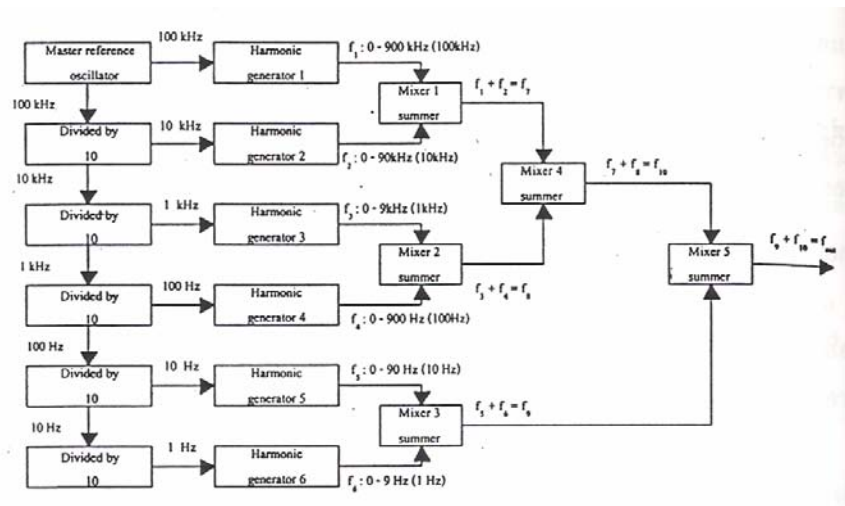
วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลหลายๆตัว เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้การผสมสัญญาณแบบไม่เชิงเส้นจากคริสตัลหลายๆตัว และการทำการกรอง เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกันจากคริสตัล 20 ตัวกับวงจรแวก์ 2 มอดูล(Module) ด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.7.1 สำหรับค่าความถี่ของคริสตัลที่แสดงไว้สามารถจะสังเคราะห์ความถี่ได้ในช่วงความถี่ 510 kHz ถึง 1790 kHz โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 kHz วงจรสังเคราะห์ความถี่นี้สามารถนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณคลื่นพา หรือปรับเลือกช่องสัญญาณสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง AM ที่มีทั้งหมด 106 ช่อง (540 kHz ถึง 1600 kHz) จากตำแหน่งที่แสดงในรูป 2.7.1 ถ้าเลือกคริสตัลที่ให้ความถี่ 160 kHz กับ 700 kHz จะได้สัญญาณขาออกจากวงจรผสมสัญญาณได้คู่คือสัญญาณความถี่ผลรวม และสัญญาณความถี่ผลต่าง ($700 \text{ kHz} \pm 160 \text{ kHz} = 540 \text{ kHz}$ และ 860 kHz) และเมื่อปรับเลือกความถี่ของวงจรกรองให้ได้ 540 kHz ซึ่งจะได้ความถี่คลื่นพาของช่อง 1 ออกมา ค่าความถี่ต่ำสุดที่ใช้แบ่งระหว่างความถี่ขาออกสำหรับวงจรสังเคราะห์

ความถี่คือ ค่าความละเอียด (Resolution) ซึ่งในวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่แสดงดังรูปที่ 2.7.1 นี้มีค่าความละเอียดคือ 10 kHz



รูปที่ 2.7.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลหลายๆตัว

วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลตัวเดียวเป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้ทั้งการเพิ่ม การลด การคูณและการหารความถี่เพื่อให้ได้ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 999,999 Hz โดยมีความถี่ที่ห่างกัน 1 Hz จากคริสตัลตัวเดียวที่มีความถี่ 100 kHz ซึ่งเรียกกันว่าวงจรแกว่งหลักใหญ่ (Master oscillator) ดังแสดงในรูปที่ 2.7.2 ความถี่จากวงจรแกว่งหลักใหญ่นี้จะเป็นความถี่ฐาน (Base frequency) ที่ถูกหารด้วยค่า 10 หลายๆครั้งจนได้ความถี่ฐานย่อย (Sub base frequency) 5 ค่าด้วยกันคือ 10 kHz, 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz และ 1 Hz ในแต่ละสัญญาณความถี่ฐานย่อยเหล่านี้จะป้อนไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ (Harmonic generator) หรือวงจรคูณความถี่ (Frequency multiplier) ของแต่ละความถี่นั้นๆ โดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์นี้จะประกอบวงจรขยายไม่เชิงเส้น (Non-linear amplifier) และวงจรกรองปรับเลือกความถี่ได้ (Tunable filter) ซึ่งวงจรกรองจะทำหน้าที่เลือกความถี่ฮาร์โมนิกส์แรก 9 ค่าจากความถี่ฐานย่อยนั้นๆ ดังนั้นเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์เครื่องที่ 1 ก็จะทำให้ความถี่ขาออกที่เป็นไปได้ตั้งแต่ 0 kHz ถึง 900 kHz โดยมีความถี่ที่ห่างกัน 100 kHz สำหรับเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์เครื่องที่ 2 ก็จะทำให้ความถี่ขาออกที่เป็นไปได้ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 90 kHz โดยมีความถี่ที่ห่างกัน 10 kHz เช่นเดียวกันกับเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์อื่นๆ



รูปที่ 2.7.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่จากคริสตัลตัวเดียว

ตารางที่ 2.7.1 ตำแหน่งของสวิทช์และฮาร์มอนิกส์

Harmonic Generator	Selected Output Frequency	Mixer Output Frequency
1	200 kHz	Mixer 1 out = 200 kHz + 40 kHz = 240 kHz
2	40 kHz	
3	6 kHz	Mixer 2 out = 6 kHz + 0.3 kHz = 6.3 kHz
4	0.3 kHz	
5	10 Hz	Mixer 3 out = 10 Hz + 3 Hz = 13 Hz
6	3 Hz	
		Mixer 4 out = 240 kHz + 6.3 kHz = 246.3 kHz
		Mixer 5 out = 246.3 kHz + 13 Hz = 246.313 kHz

ค่าความถี่ละเอียดของวงจรสังเคราะห์ความถี่หาได้จากจำนวนครั้งที่ความถี่จากวงจรแกว่งหลักใหญ่ถูกหาร อย่างในวงจรสังเคราะห์ความถี่ตามในรูปที่ 2.7.2 จะมีค่าความละเอียดของความถี่เป็น 1 Hz วงจรผสมสัญญาณที่ใช้ที่นี่จะเป็นวงจรผสมสัญญาณแบบไดคูลที่ทางด้านออกมีวงจรกรองสำหรับปรับเลือกความถี่ผลรวมของความถี่ขาเข้าทั้งสองความถี่ อย่างในตัวอย่างดังที่แสดงในตารางที่ 2.7.1 จะให้ความถี่ออกมา เท่ากับ 246,313 Hz โดยตารางที่ 2.7.1 นี้เป็นตำแหน่งของสวิตช์เลือกของเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ในแต่ละเครื่อง และความถี่ขาเข้ากับความถี่ขาออกจากวงจรมอดูเลชันแต่ละวงจร โดยจะเห็นว่าวงจรมอดูเลชันที่มีอยู่ 5 วงจรจะรวมความถี่ขาออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ 6 เครื่องพร้อมด้วยระดับการผสมสัญญาณทั้งหมด 3 ระดับ

2.7.2 การสังเคราะห์ความถี่ทางอ้อม

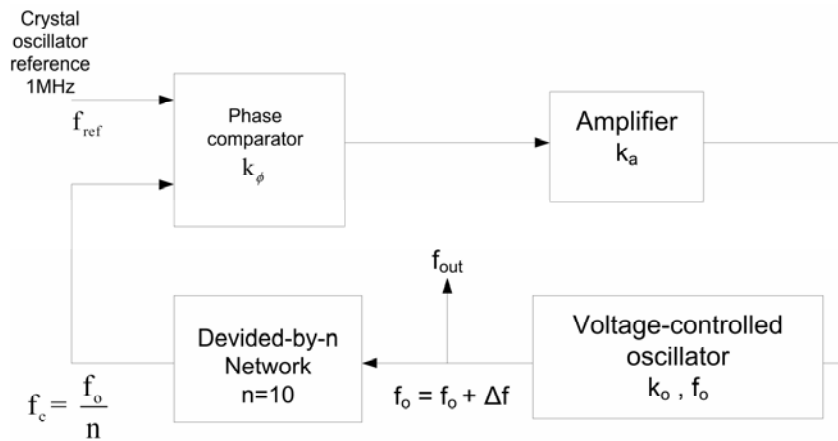
วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูล (Phase-locked loop frequency synthesizer) เป็นวิธีการสังเคราะห์ความถี่ที่นิยมมากในปัจจุบัน จากรูปที่ 2.7.3 เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลที่มีลูปเดียวโดยมีวงจรแกว่งแบบคริสตัลเป็นวงจรที่สร้างความถี่อ้างอิง และช่วงความถี่ที่ถูกสร้างขึ้น และค่าความถี่ละเอียดจะขึ้นกับวงจรรวมความถี่รวมทั้งอัตราขยายลูปเปิด (Open-loop gain) วงจรรวมความถี่ที่ใช้ในที่นี้เป็นวงจรรวมด้วย n (Divider-by- n circuit) ที่สามารถออกแบบได้จากวงจรนับขึ้น-ลงแบบเชิงเลขที่โปรแกรมได้ (Programmable digital up-down counter) ซึ่งจะให้ความถี่ออกมาเป็น $f_c = f_0/n$ โดยที่ f_0 เป็นความถี่ขาออกของ VCO คือ $f_0 = n f_{ref}$ ดังนั้นวงจรสังเคราะห์ความถี่ความถี่จึงเป็นวงจรมอดูเลชันความถี่ด้วยจำนวน n เท่า (Times- n frequency multiplier) โดยปริยาย สำหรับวงจรรวมความถี่นี้จะไปมีส่วนในการลดอัตราขยายลูปเปิดด้วยค่าตัวประกอบ n ฉะนั้นวงจรอื่นๆที่อยู่ในลูปจะต้องมีอัตราขยายที่สูงตามสัดส่วนไปด้วย อัตราขยายลูปของวงจรสังเคราะห์ความถี่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7.3 คือ

$$k_v = \frac{k_d k_a k_o}{n}$$

จากสมการข้างบนนี้ จะเห็นได้ว่าขณะที่ n เปลี่ยน อัตราขยายลูปเปิดจะเปลี่ยนไปอย่างผกผันตามสัดส่วน วิธีที่จะแก้ปัญหานี้คือการโปรแกรมอัตราขยายของวงจรรวมให้มีค่าตามอัตราส่วนของตัวหาร ดังนั้นอัตราขยายลูปเปิดคือ

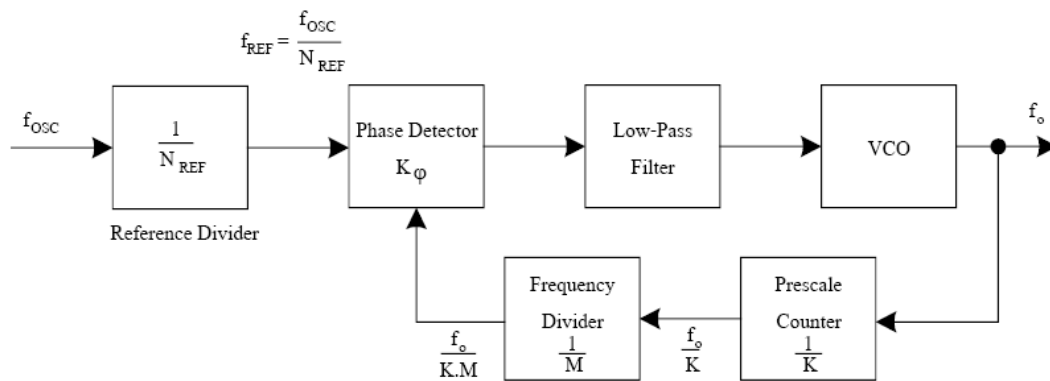
$$k_v = \frac{n(k_d k_a k_o)}{n} = k_d k_a k_o$$

สำหรับความถี่อ้างอิงและวงจรรวมที่แสดงดังรูปที่ 2.7.3 จะได้ช่วงความถี่ขาออกเป็น $f_0 = n f_{ref} = f_{ref}$ ถึง $10 f_{ref} = 1\text{MHz}$ ถึง 10MHz



รูปที่ 2.7.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลูป

สำหรับในการทำงานเราเลือกใช้การสังเคราะห์ความถี่ทางอ้อมแบบ Prescaled (Prescaled Synthesizer) ดังรูปที่ 2.7.4



รูปที่ 2.7.4 วงจรสังเคราะห์ความถี่แบบ Prescaled (Prescaled Synthesizer)

วงจรมีค่าคงที่ (Fixed Prescale Counter) ซึ่งมีความถี่ปฏิบัติงานสูงสุด f_{OMAX} จะทำการทอนความถี่ลงมา มีขนาดเท่ากับ $\frac{f_{OMAX}}{K}$ ซึ่งอยู่ในย่านที่ตัวหารความถี่ (Frequency Divider) สามารถทำงานได้

สำหรับ Channel Space: f_{CH} ของวงจรมีค่าหาได้จากสมการ

$$f_{CH} = Kf_{REF} = \frac{K}{N_{REF}} f_{OSC}$$

$$M_{MAX} = \frac{f_{OMAX}}{f_{CH}} = \frac{f_{OMAX}}{Kf_{REF}}$$

$$M_{MIN} = \frac{f_{OMIN}}{f_{CH}} = \frac{f_{OMIN}}{Kf_{REF}}$$

ส่วนค่าคงที่ของตัวหารสุทธิ (Total Divider Constant) ในทางเดินป้อนกลับ หาได้จาก

$$N = KM$$

$$N_{MAX} = KM_{MAX}$$

$$N_{MIN} = KM_{MIN}$$

2.8 วงจรสังเคราะห์ความถี่ในทางปฏิบัติ (Practical Synthesizers)

เราใช้วงจรมอดูเลชันด้วยค่า N ต่อในทางเดินป้อนกลับของ PLL เพื่อเพิ่มความถี่เอาต์พุตให้กับตัวสังเคราะห์ความถี่

วงจรมอดูเลชัน CMOS ใช้กระแสค่อนข้างน้อย แต่มีความถี่ปฏิบัติการสูงสุด (Max Operating Frequency) ประมาณ 6MHz เท่านั้น ในขณะที่วงจรมอดูเลชัน TTL สามารถใช้ได้ถึง 20MHz แล้วการเลือกใช้ วงจรมอดูเลชัน ECL ซึ่งมีความถี่ปฏิบัติการสูงสุดอยู่ระหว่าง 100MHz – 300MHz ก็เป็นการแก้ปัญหาวิธีหนึ่ง แต่อุปกรณ์ ECL มักมีราคาสูง และใช้กระแสสูง

ปัญหาของความถี่อ้างอิงที่อินพุต (f_{REF}) โดยทั่วไปแล้ว ค่า N ของวงจรมอดูเลชันในทางเดินป้อนกลับ จะถูกออกแบบให้สามารถปรับแต่งได้ระหว่าง N_{MIN} และ N_{MAX} ทำให้ขนาดของความถี่เอาต์พุตต่างๆ อยู่ระหว่าง f_{OMIN} และ f_{OMAX} เพื่อให้ Channel Space : f_{CH} ระหว่างค่าของความถี่เอาต์พุต; f_0 ต่างๆ มีความละเอียดอย่างเพียงพอ จึงมักกำหนดให้ความถี่อ้างอิงที่อินพุต: $f_{REF} \leq 10\text{kHz}$ แต่ปรากฏว่าวงจรมอดูเลชันสัญญาณที่ใช้คริสตัลที่ใช้ทั่วไปมี $f_{OSC} \geq 1\text{MHz}$ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทอน f_{OSC} ลงมาอยู่ในระดับ f_{REF} ที่ต้องการ ก่อนที่จะต่อเข้าอินพุตของตัวตรวจจับเฟสใน PLL

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างวงจรเฟสล็อกกลุ่

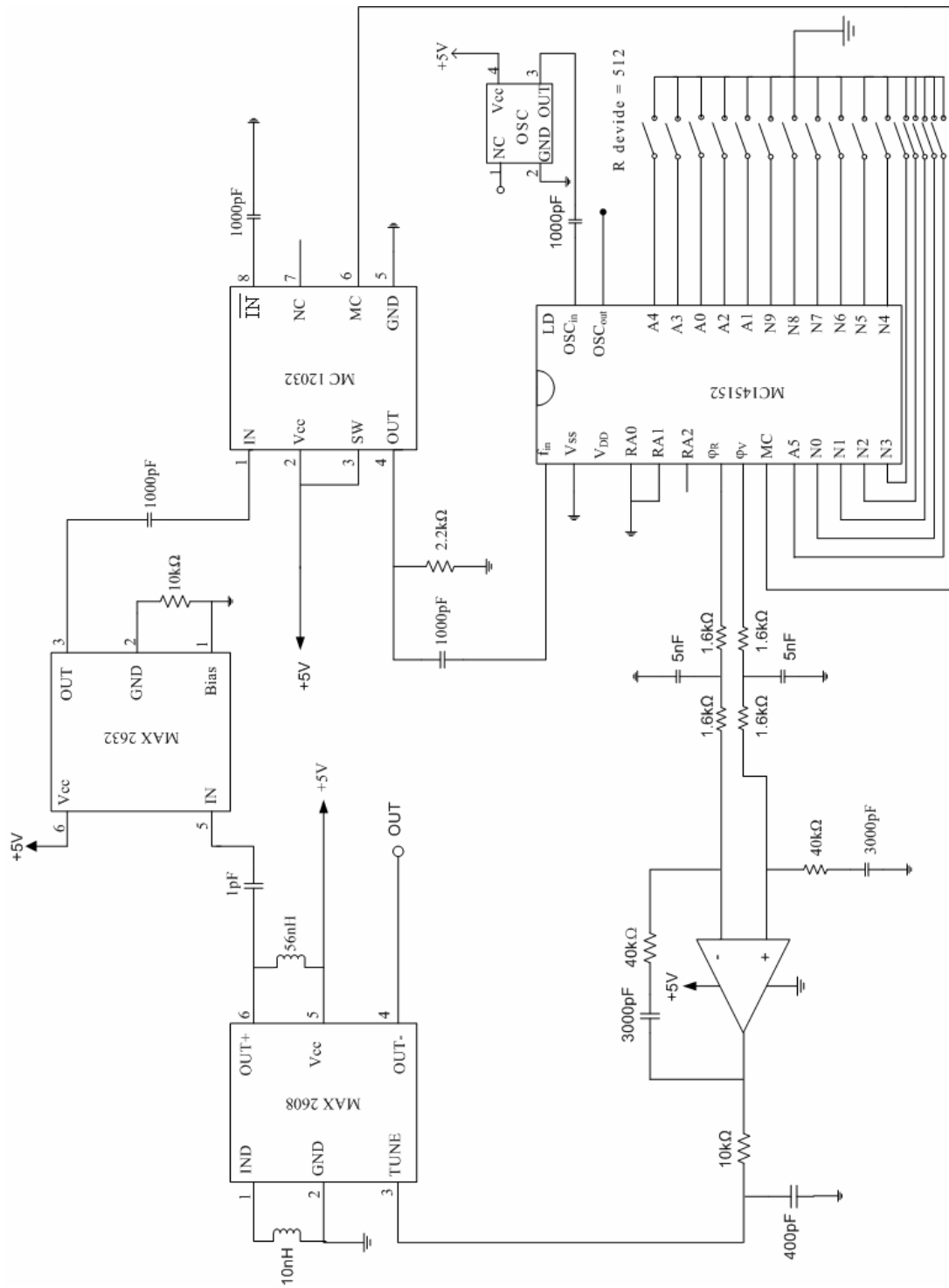
การจะสร้างวงจรเฟสล็อกกลุ่่นั้นมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการออกแบบและเลือกใช้อิชิการออกแบบนั้นทำให้ได้วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

วงจรสังเคราะห์ความถี่นี้ได้ออกแบบวงจรให้เป็นแบบเฟสล็อกกลุ่ โดยมีลักษณะการทำงานแบบ Parallel input PLL Frequency Synthesizer Interface with Dual Modulus Prescalers คือมีการหารสองครั้ง ซึ่งจะมีความสะดวกในการกำหนดค่าความถี่ที่ทำการสังเคราะห์ ซึ่งทำได้โดยการสร้างสัญญาณเลขฐานสองป้อนเข้าที่อิชิที่ขา N และ A เท่านั้น โดยค่าสัญญาณเลขฐานสองนี้กำหนดจาก Dipswitch ส่วนความถี่หลักที่ใช้เป็นฐานตัวเลขในการเปรียบเทียบนั้นมาจากชุด Oscillator 10 MHz Reference ซึ่งจะทำหน้าที่ผลิตความถี่ความถี่ 10 MHz ออกมา เพื่อทำการเปรียบเทียบความถี่ที่ต้องการกับความถี่ฐาน ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะส่งต่อไปยังชุดวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งทำหน้าที่กรองสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกมาค่าหนึ่ง

ซึ่งแรงดันกระแสตรงค่านี้จะถูกป้อนให้กับ VCO และในส่วนนี้เป็นสิ่งสำคัญมากในการสังเคราะห์ความถี่สูง สัญญาณที่ได้จะถูกส่งผ่านเข้าสู่วงจรหาร (Prescalers) เพื่อหารสัญญาณให้มีความถี่ต่ำลงก่อนที่จะส่งผ่านเข้าไปทำการเปรียบเทียบกับความถี่ฐาน

3.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรเฟสล็อกกลุ่

จากรูปที่ 3.1 นั้นแสดงถึงวงจรเฟสล็อกกลุ่ที่เราออกแบบไว้โดยเลือกใช้อิชิที่มีคุณสมบัติตามที่เราต้องการ จากนั้นเรานำโปรแกรม Protel 99SE มาออกแบบวงจรตามรูปที่ 3.1 เพื่อที่ได้ลายวงจรเป็นแผ่นลายทองแดงที่จะสามารถนำมาใช้งานได้ เราก็จะได้ลายวงจรที่เป็นแผ่นทองแดงดังรูปที่ ก-1 แสดงในไว้ในภาคผนวก ก



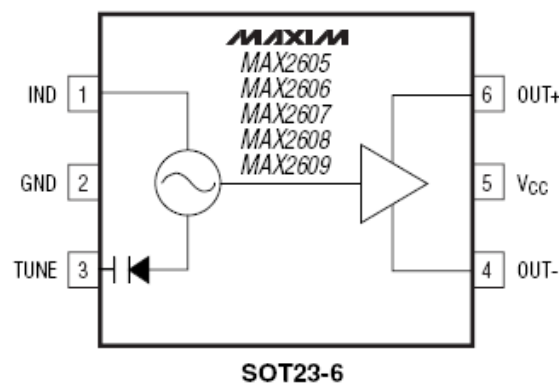
รูปที่ 3.1 วงจรเฟสล็อกที่ทำการออกแบบเบื้องต้น

3.2 การเลือกไอซีในการออกแบบวงจรเฟสล็อกคูลูป

Oscillator 10MHz ใช้เป็นแหล่งจ่ายความถี่ฐาน 10MHz ก่อนที่จะจ่ายให้แก่วงจรเฟสล็อกคูลูป เพื่อนำไปหารด้วยค่า 512 ให้มีความถี่ที่ต่ำลง สาเหตุที่เลือกค่าออสซิลเลเตอร์ 10MHz และค่าตัวหารภายในวงจรเฟสล็อกคูลูปเท่ากับค่า 512 เพราะต้องการความถี่อ้างอิงคือ 19.53125 kHz เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่ออกมาจากวงจร VCO ซึ่งค่าความถี่อ้างอิงนั้นมาจากการนำค่าความถี่ออสซิลเลเตอร์ (10MHz) หารด้วยค่าตัวหารภายในวงจรเฟสล็อกคูลูป (512)

MAX2608 เป็นตัว VCO มีประสิทธิภาพสูงสำหรับความถี่ IF ซึ่งถูกออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับระบบสื่อสารไร้สาย และยังมี noise ต่ำ นอกจากนั้นยังใช้พลังงานต่ำในการทำงานเพียง +2.7V ถึง 5.5 V และยังให้ช่วงความถี่ที่กว้าง สาเหตุที่เลือกเพราะสามารถให้ค่าความถี่ในช่วงที่ต้องการได้ อีกทั้งหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก

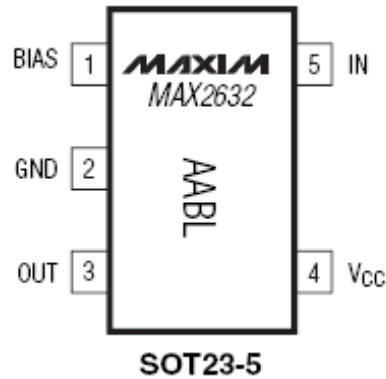
จากรูปที่ 3.2 ขาที่ 1เราจะทำการใส่ตัวเหนี่ยวนำเพื่อจูน Center frequency และขาที่ 3เป็น voltage ที่ใช้ในการจูนความถี่ สำหรับไอซีนี้จะมีเอาต์พุตอยู่ 2 ค่า คือ ค่าหนึ่งเป็นเอาต์พุตของเครื่องส่งอยู่ที่ขาที่ 4 อีกค่าหนึ่งเป็นเอาต์พุตที่อยู่ในวงจรซึ่งอยู่ที่ขาที่ 6 ส่วนขาที่ 5 เป็นที่จ่ายกระแสไฟให้กับไอซี



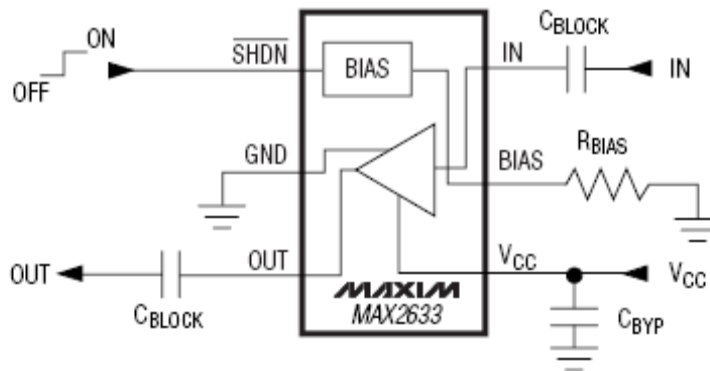
รูปที่ 3.2 Functional Diagram ของ MAX2608

MAX2632 เป็น Amplifier ใช้ขยายสัญญาณที่เข้าตัวหาร (MC12032A) เพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่มาจาก VCO เพิ่มขึ้นและมีความเสถียรขึ้น หากไม่มี Amplifier ตัวนี้จะทำให้สัญญาณที่ออกจากตัวหารมีการกวัดแกว่งไม่คงที่

จากรูปที่ 3.3 เราจะรับสัญญาณอินพุทที่ออกมาจาก ตัว VCO เข้าที่ขาที่ 5 และที่ขาที่ 1 เราจะใส่ตัวต้านทานเข้าไปเพื่อเลือก gain ของ Amplifier โดยเราสามารถดูค่าตัวต้านทานนี้ได้จาก Datasheet และสัญญาณที่ได้จะออกที่ขาที่ 5



รูปที่ 3.3 ไอซีเบอร์ MAX2632

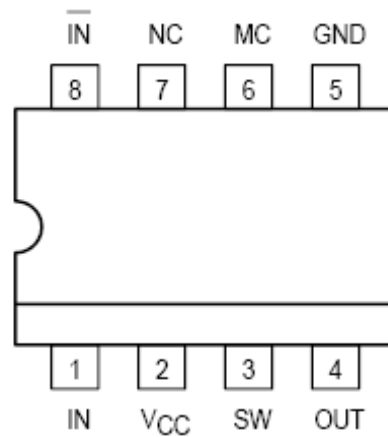


รูปที่ 3.4 Functional Diagram ของ MAX2632

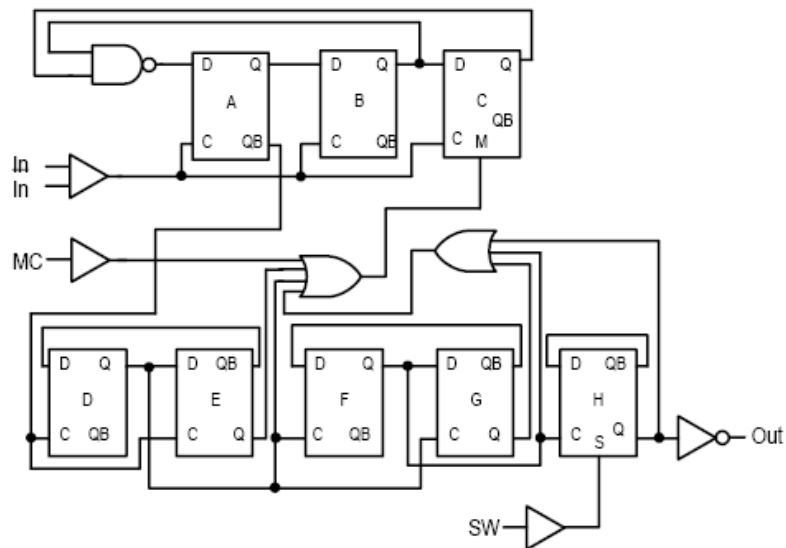
MC12032A เป็นตัวควบคุมอัตราส่วนการหาร สามารถเลือกได้ 2 ค่า คือ 64/65 หรือ 128/129 และไอซีตัวนี้สามารถใช้ร่วมกับ CMOS Synthesizer สาเหตุที่เลือกเพราะต้องการใช้ค่าตัวหารเท่ากับ 64 และไอซีนี้มีค่าตัวหารเท่ากับค่าที่ต้องการ การที่เราต้องการด้วยค่า 64 เนื่องจาก ไอซี **MC145152P2** ซึ่งเป็นวงจรเฟสล็อกกลุ่ปนั้นทำงานในย่านความถี่ต่ำ แต่ความถี่ที่ออกมาจาก VCO นั้นมีความถี่สูง

เราจึงต้องใช้ตัว prescaler นี้หารความถี่ที่ออกมาจาก VCO ให้มีความถี่ที่ต่ำลงก่อนป้อนให้แก่ วงจรเฟสล็อกต่อไป

จากรูปที่ 3.5 ขาที่ 1 จะเป็นขาอินพุทที่รับสัญญาณมาจากตัว Amplifier ขาที่ 2 จะเป็นขาที่จ่าย กระแสไฟเข้าไอซี และขาที่ 3 จะใช้ในการปรับเลือกค่าตัวหาร โดยในการทดลองจะให้ SW เป็น High เพื่อให้ได้ค่าตัวหารเป็น 64/65 ส่วนขาที่ 6 MC หรือ Modulus control จะเป็นตัวควบคุม Dual module และสัญญาณเอาท์พุทจะออกที่ขาที่ 4



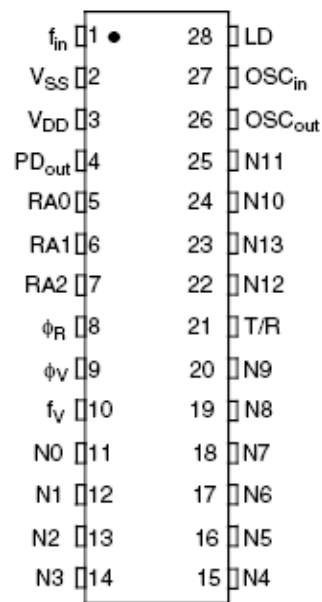
รูปที่ 3.5 ไอซีเบอร์ MC12032A



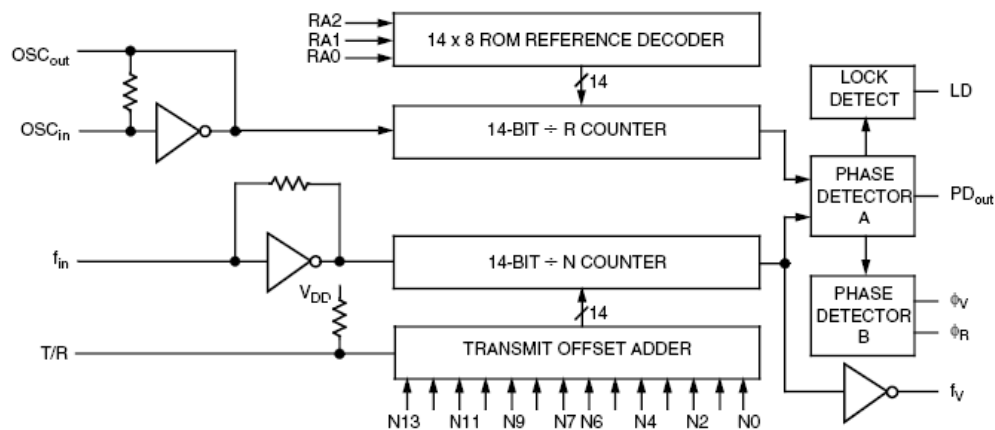
รูปที่ 3.6 Logic Diagram ของ MC12032A

MC145152P2 เป็น PLL Frequency Synthesizer (CMOS) ทำงานในย่านความถี่ต่ำ รองรับการใช้งานกับ Dipswitch สาเหตุที่เลือกเพราะต้องการใช้ Dipswitch ในการควบคุมตัวหารที่จะนำมารวมความถี่ที่มาจากทั้ง VCO และจากออสซิลเลเตอร์ โดยผ่านทางขาของไอซีแบบขนานทั้ง 16 ขาและจากขา RA0, RA1 และ RA2 อีกทั้งหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก

จากรูปที่ 3.7 RA0-RA2 เป็นตัวหารความถี่อ้างอิง ส่วน A0-A5, N0-N9 เป็นขาที่ใช้กำหนดค่าหารความถี่ สัญญาณที่ได้จะออกที่ ϕ_R, ϕ_V



รูปที่ 3.7 ไอซีเบอร์ MC145152P2

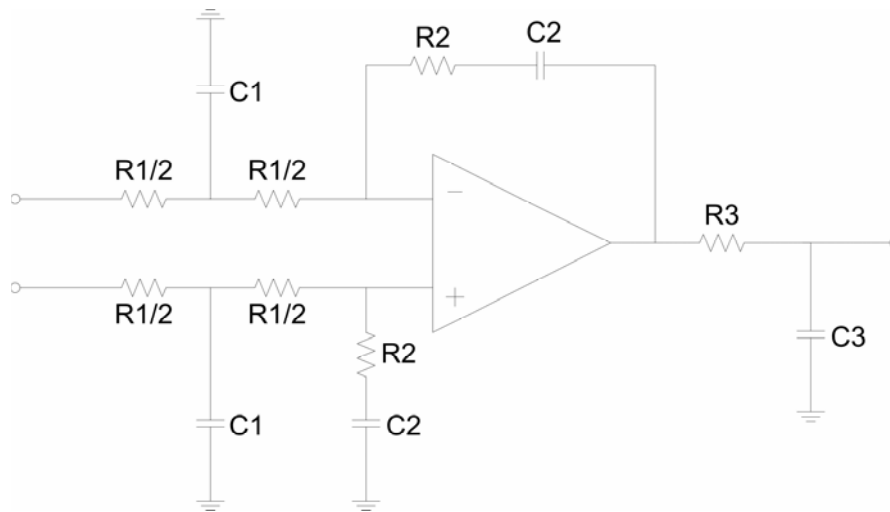


รูปที่ 3.8 Block Diagram ของ MC12032A

3.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter)

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนี้เพื่อจะทำหน้าที่แปลงระดับของการ Locked ทางเฟส มาเป็นระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (PLL filter) โดยใช้ไอซี ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากการที่เราใช้ไอซี MC145152 P2 (PLL Chip) ในการออกแบบ ที่ความถี่ในการคำนวณตั้งแต่ 490 - 510 MHz และใช้ OP-Amp ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จาก
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_\phi K_{VCO}}{NC_1 R_2}}$$

$$\zeta = \frac{\omega_n C_2 R_2}{2} \quad \text{Damping factor}$$

เมื่อ
$$K_\phi = \frac{V_{DD}}{2\pi} = \frac{5V}{2\pi} = 0.796 \text{ Volt/rad}$$

เลือกค่า $\zeta = 0.707$

จาก

$$\begin{aligned}\omega_n &= \frac{2\pi f_R}{10}, \text{ } f_R \text{ คือ ช่วงห่างของแต่ละความถี่ซึ่งเท่ากับ } 19531.25 \text{ Hz} \\ &= \frac{2\pi \times 19531.25}{10} = 12271.85 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned}K_{VCO} &= \frac{2\pi\Delta f_{VCO}}{\Delta V_{VCO}} \\ &= \frac{2\pi \times (510 - 490) \times 10^6}{3 - 0.3} \\ &= 4.65 \times 10^7 \text{ rad/s/V}\end{aligned}$$

และ $f_{avg} = \frac{(490 + 510) \times 10^6}{2} = 500 \text{ MHz}$

$$N_{avg} = \frac{f_{avg}}{f_R} = \frac{500 \times 10^6}{19531.25} = 25600$$

กำหนดให้ค่าของ $C_2 = 3000 \text{ pF}$ ดังนั้นสามารถทำการคำนวณค่าของ R_1 ได้ดังนี้

จาก

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{K_\phi K_{VCO}}{C_2 \omega_n^2 N_{avg}} \\ &= \frac{0.796 \text{ V/rad} \times 4.65 \times 10^7 \text{ rad/s/V}}{3000 \text{ pF} \times (12271.85 \text{ rad/s})^2 \times 25600} \\ &= 3200 \Omega \\ &= 3.2 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเลือกค่าของ R_1 เท่ากับ $3.2 \text{ k}\Omega$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าของ R2 ได้ดังนี้

จาก

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{2\zeta}{\omega_n C_2} \\ &= \frac{2 \times 0.707}{12271.85 \text{ rad/s} \times 3000 \text{ pF}} \\ &= 38407 \ \Omega \\ &= 38.407 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเลือกค่าของ R2 ได้ประมาณ 40 k Ω

จาก $C_1 = \frac{4}{R_1 \omega_{RC}}$

และ $\omega_{RC} = 10\omega_B$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \omega_B &= \omega_n \sqrt{1 + 2\zeta^2 + \sqrt{2 + 4\zeta^2 + 4\zeta^4}} \\ &= 12271.85 \sqrt{1 + 2(0.707)^2} \sqrt{2 + 4(0.707)^2 + 4(0.707)^4} \\ &= 12271.85(2.058) \\ &= 25255.9 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \omega_{RC} &= 10 \times \omega_B \\ &= 10 \times 25255.9 \\ &= 252559 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore C_1 &= \frac{4}{3200 \ \Omega \times 252559 \text{ rad/s}} \\ &= 4.9 \text{ nF} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถเลือกค่าของ C1 ได้ประมาณ 5 nF

กำหนดให้ค่าของ $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ดังนั้นสามารถทำการคำนวณค่าของ C_3 ได้ดังนี้

จาก

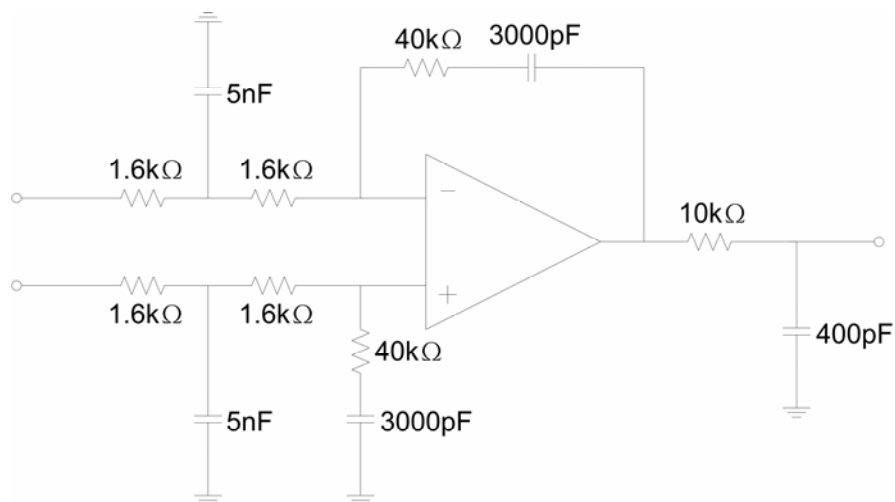
$$C_3 = \frac{1}{\omega_{RC} \times R_3}$$

$$C_3 = \frac{1}{252559 \text{ rad/s} \times 10 \text{ k}\Omega}$$

$$= 395.95 \text{ pF}$$

ดังนั้นสามารถเลือกค่าของ C_3 ได้ประมาณ 400 pF

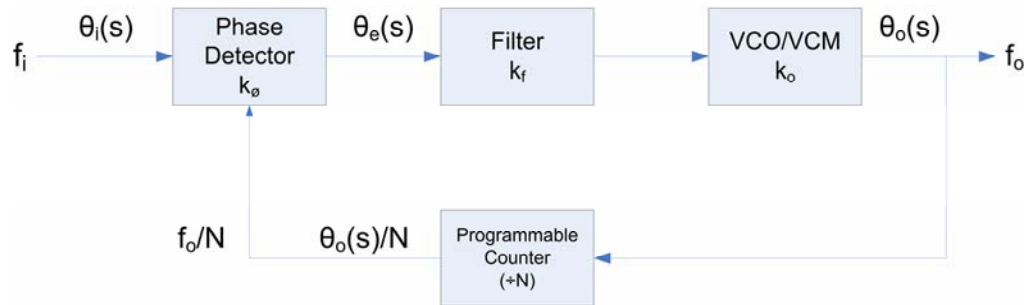
จากการคำนวณทั้งหมดเราสามารถทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านได้ค่าต่างๆดัง
แสดงในรูป



รูปที่ 3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้จากการคำนวณ

3.4 การพิจารณาผลการตอบสนองของระบบ

จาก Block Diagram of Phase Locked Loop



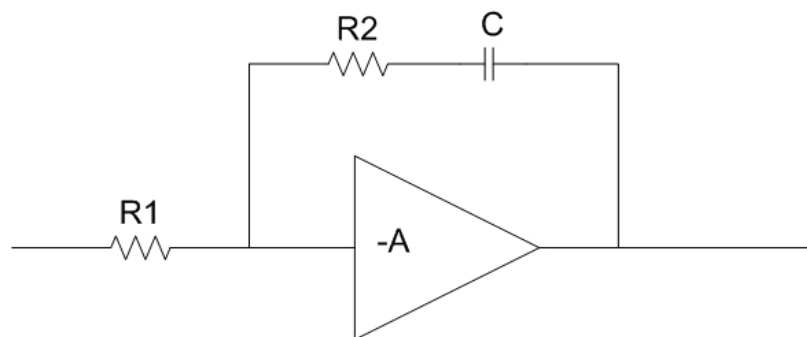
รูปที่ 3.11 Block Diagram of Phase Locked Loop

จาก $k_\phi = 0.796 \text{ V/rad}$

$$k_o = \frac{K_{\text{VCO}}}{s} = \frac{4.65 \times 10^7 \text{ rad/s/V}}{s}$$

ทำการคำนวณหาค่า k_f

เนื่องจาก Low pass filter ที่ใช้ในวงจรเฟสล็อกถูกเป็นแบบ Active Low pass filter

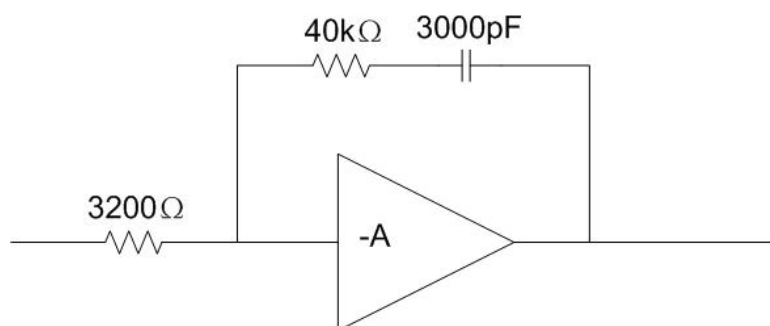


รูปที่ 3.12 Active filters Design

ค่า k_f สามารถอธิบายโดย

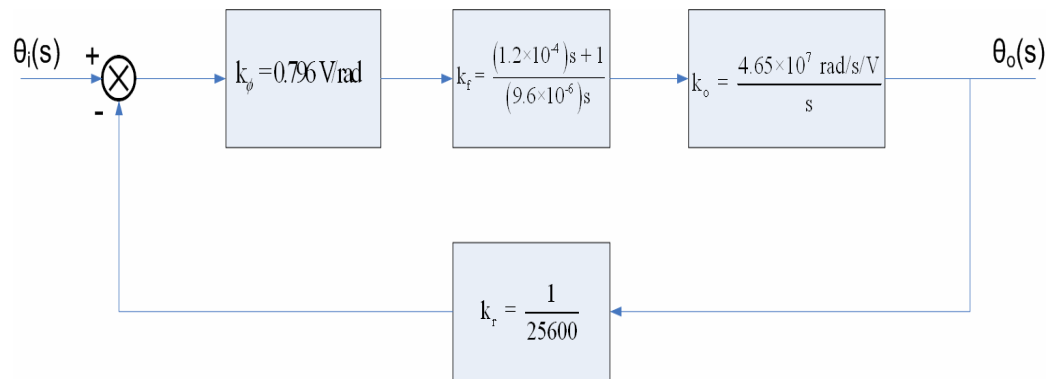
$$k_f = \frac{R_2 C s + 1}{R_1 C s} \quad \text{เมื่อ Gain A มีค่ามาก}$$

เนื่องจาก Low pass filter ที่เราได้ทำการออกแบบเป็นอันดับสามเราจึงใช้รูปแบบ
อันดับหนึ่งในการประมาณผลตอบสนองของระบบ โดยที่



รูปที่ 3.13 Active filter ที่คำนวณได้

$$\begin{aligned} k_f &= \frac{(40 \times 10^3 \times 3000 \times 10^{-12})s + 1}{(3200 \times 3000 \times 10^{-12})s} \\ &= \frac{(1.2 \times 10^{-4})s + 1}{(9.6 \times 10^{-6})s} \end{aligned}$$



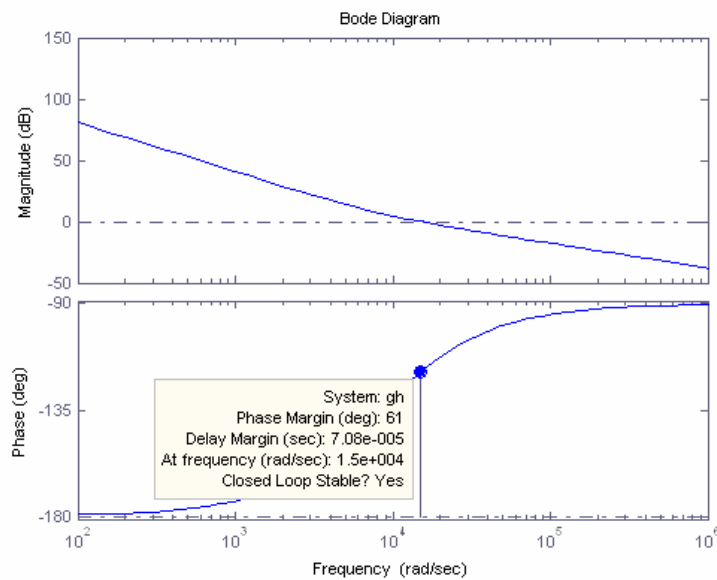
รูปที่ 3.14 block diagram ที่ได้

Open loop transfer function

จะได้
$$GH(s) = \frac{4442s + (3.7 \times 10^7)}{0.338s^2}$$

เมื่อเรานำไปพล็อตกราฟ Bode จะได้ Phase Margin = 61°

จึงสรุปได้ว่า Low pass filter ที่ได้ทำการออกแบบ จัดอยู่ในระบบที่มีความเสถียรภาพ

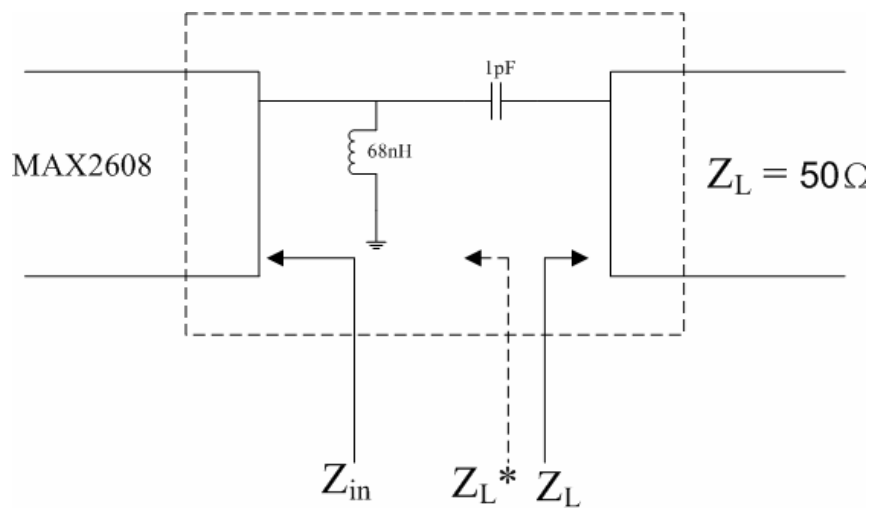


รูปที่ 3.15 แผนภาพโบด

3.5 การออกแบบ Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632

การ Match Impedance มีความสำคัญมากในวงจร RF เพื่อที่จะทำให้มีการส่งผ่านกำลังงานจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ความจำเป็นในการส่งผ่านกำลังงานไปยังด้านอินพุตของเครื่องรับ ซึ่งการสูญเสียที่ไม่จำเป็นในวงจรจะทำให้สัญญาณขนาดเล็กเกินกว่าที่จะยอมรับได้ ดังนั้นในแต่ละอุปกรณ์ต้องมั่นใจว่าการต่อจะต้องแมตช์ด้วยโหลดที่ถูกต้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่าในวงจรดีซี การส่งผ่านกำลังงานสูงสุดจากแหล่งจ่ายไปยังโหลด จะเกิดเมื่อตัวต้านทานของโหลดเท่ากับตัวต้านทานของแหล่งจ่าย ส่วนในกรณีของวงจรเอซี อิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_L) จะต้องเท่ากับการคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย เพื่อให้ส่วนของจำนวนจินตภาพหักล้างกันไป เหลือแต่ส่วนของจำนวนจริง (R_S กับ R_L) เมื่อ R_S กับ R_L เท่ากัน ดังนั้นการส่งผ่านกำลังงานสูงสุดก็จะเกิดขึ้น



รูปที่ 3.16 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 กับ สายส่งสัญญาณ

ในขั้นแรกเราต้องทำการ Match สายนำสัญญาณกับ MAX2608 ก่อน

กำหนดให้ $Z_0 = 50\Omega$ และ ความถี่ 400 MHz

$$Z_L^* = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{50\Omega}{50\Omega} = 1$$

C อนุกรม: จาก $Z_0 X_C = \frac{1}{2\pi f C}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C Z_0}$$

$$= \frac{1}{2\pi(400\text{MHz})(1\text{pF})(50\Omega)}$$

$$= 7.9577$$

$$X_C = -j7.9577$$

L ขนาน:

$$\text{จาก } Z_0 X_L = 2\pi f L$$

$$X_L = \frac{2\pi f L}{Z_0}$$

$$= \frac{2\pi(400\text{MHz})(68\text{nH})}{(50\Omega)}$$

$$= 3.4180$$

$$X_L = j3.4180$$

$$\text{จาก } Z_A - Z_L^* = X_C$$

$$Z_A - 1 = -j7.9577$$

$$Z_A = 1 - j7.9577$$

$$\text{และ } y_{in}' - y_A = \frac{1}{Z_{in}'} - \frac{1}{Z_A}$$

$$B_L = \frac{1}{Z_{in}'} - \frac{1}{Z_A}$$

$$\text{เมื่อ } B_L = \frac{1}{X_L}$$

$$\text{จะได้ว่า } \frac{1}{X_L} = \frac{1}{Z_{in}'} - \frac{1}{Z_A}$$

$$\frac{1}{Z_{in}'} = \frac{1}{X_L} + \frac{1}{Z_A}$$

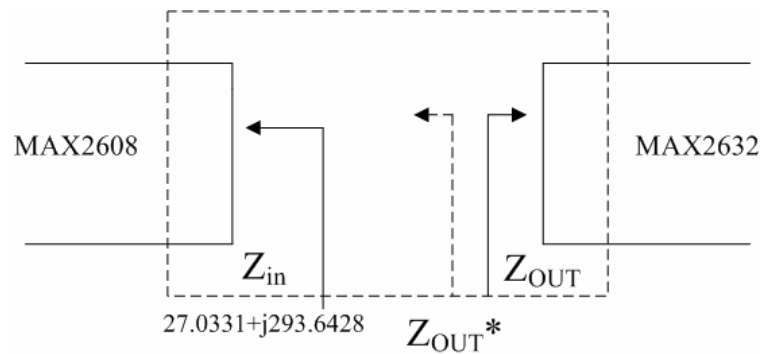
$$\frac{1}{Z_{in}'} = \frac{1}{j3.4180} + \frac{1}{1-j7.9577}$$

$$\frac{1}{Z_{in}'} = \frac{(1-j7.9577) + (j3.4180)}{(1-j7.9577)(j3.4180)}$$

$$\frac{1}{Z_{in}'} = \frac{1}{0.0155 - j0.1683}$$

$$Z_{in}' = 0.5407 + j5.8725$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } Z_{in}' &= \frac{Z_{in}}{Z_0} \\ Z_{in} &= Z_0 Z_{in}' \\ &= (50) Z_{in}' \\ \therefore Z_{in} &= 27.0331 + j293.6428 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.17 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632

เมื่อได้ค่า Z_{in} ของไอซี MAX2608 ต่อไปเราจะทำการหา Z_{OUT} ของไอซี MAX2632

หา Z_{OUT} ของ MAX2632

จาก Datasheet ได้กำหนดค่า S-parameter ที่ความถี่ 500 MHz

$$S_{11} = 0.15 \angle -99^\circ \longrightarrow S_{11} = -0.0235 - j0.1482$$

$$S_{21} = 5.19 \angle -138^\circ \longrightarrow S_{21} = -3.8569 - j3.4728$$

$$S_{12} = 0.021 \angle -70^\circ \longrightarrow S_{12} = 0.0072 - j0.0197$$

$$S_{22} = 0.5 \angle -118^\circ \longrightarrow S_{22} = -0.2347 - j0.4415$$

$$k=3.45$$

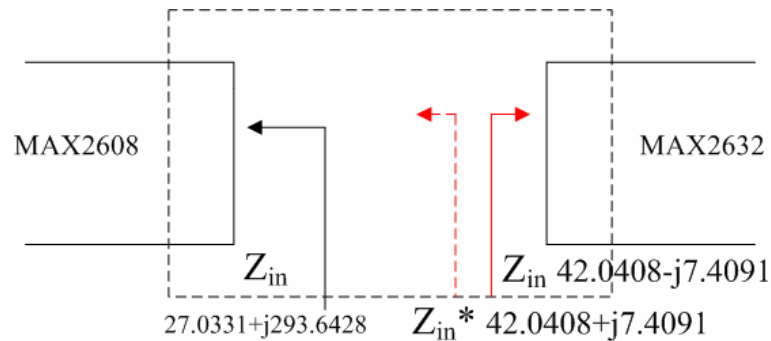
$$\text{จากสูตร } Z_{11} = \frac{Z_0(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{\Psi_1}$$

$$Z_{22} = \frac{Z_0(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{\Psi_1}$$

$$\text{เมื่อ } \Psi_1 = (1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}$$

$$\text{จะได้ } Z_{11} = 42.0408 - j7.4091 \quad (Z_{in} \text{ ของ MAX2632})$$

$$Z_{22} = 19.9912 - j20.1214 \quad (Z_{OUT} \text{ ของ MAX2632})$$



รูปที่ 3.18 Matching Impedance ระหว่าง MAX2608 และ MAX2632

การนอมอรัลไลซ์ด้วย $Z_0 = 50\Omega$

จะได้ว่า MAX2608: $Z_{in}' = \frac{27.0331 + j293.6428}{50}$
 $= 0.5407 + j5.8728 \approx 0.55 + j5.9$

MAX2632: $Z_{in}^* = \frac{42.0408 + j7.4091}{50}$
 $= 0.8408 + j0.1482 \approx 0.85 + j0.14$

นำค่าเหล่านี้ไปพล็อตลงใน Smith Chart ดังรูปที่ 3-11 จะได้ $Z_A = 0.85 - j7$

จาก $X_C = Z_A - Z_{in}^*_{(MAX2632)}$
 $= (0.85 - j7) - (0.85 + j0.14)$
 $= -j7.14$

จาก $y_{in}'_{(MAX2608)} - y_A = \frac{1}{Z_{in}'_{(MAX2608)}} - \frac{1}{Z_A}$
 $= \frac{1}{0.55 + j5.9} - \frac{1}{0.85 - j7}$
 $= (0.02 - j0.17) - (0.02 + j0.14)$

$$B_L = -j0.31$$

นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุ(C) และตัวเหนี่ยวนำ (L)

C อนุกรม: จาก $Z_0 X_C = \frac{1}{2\pi f C}$
 $C = \frac{1}{2\pi f X_C Z_0}$

$$= \frac{1}{2\pi(500\text{MHz})(7.14)(50\Omega)}$$

$$= 0.89 \text{ pF}$$

L ขนาด:

จาก

$$Z_0 X_L = 2\pi f L$$

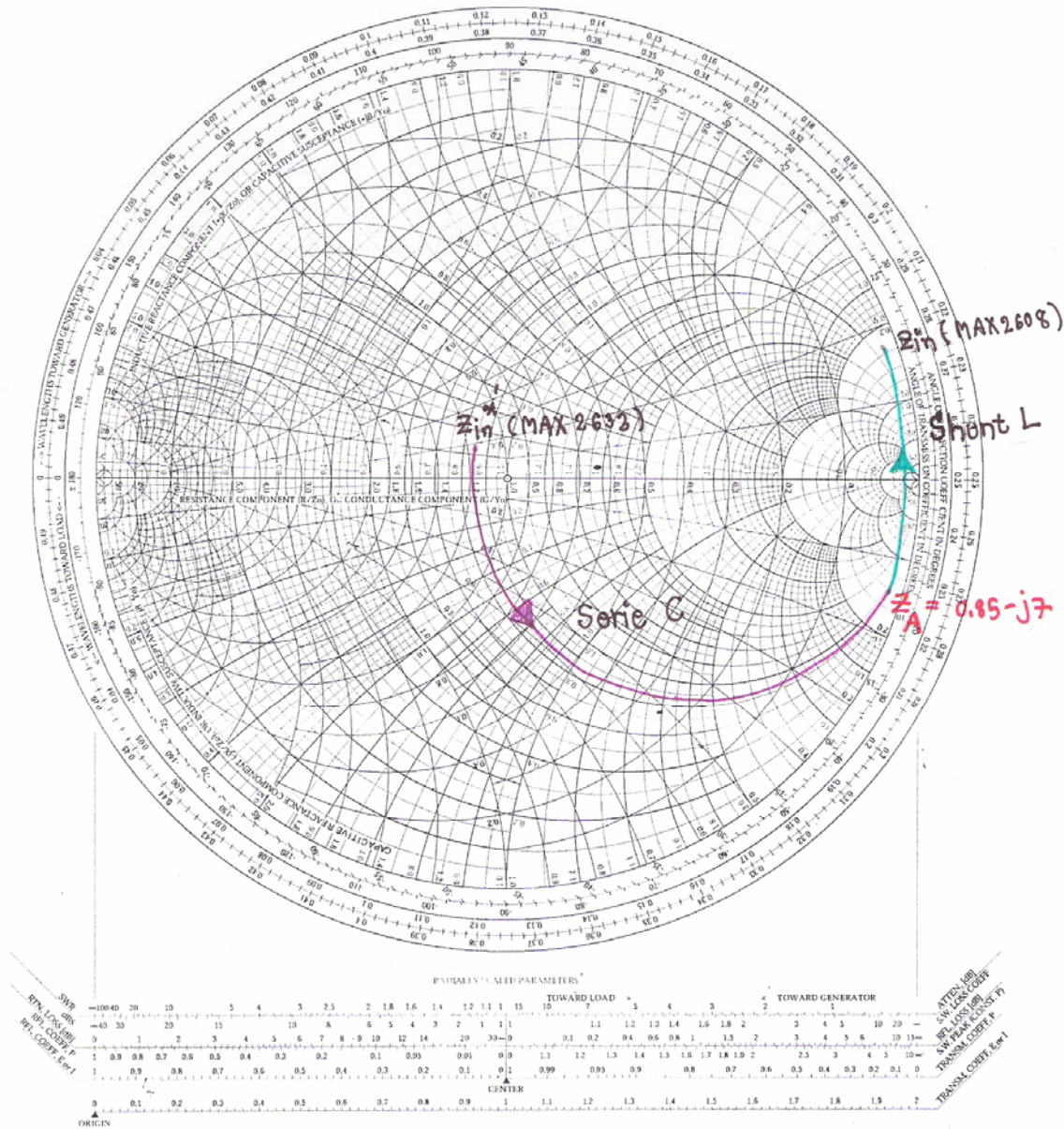
$$L = \frac{Z_0 X_L}{2\pi f} = \frac{Z_0}{2\pi f B_L}$$

$$= \frac{(50\Omega)}{2\pi(500\text{MHz})(0.31)}$$

$$= 51.34 \text{ nH}$$

NAME	TITLE	DWG. NO.
SMITH CHART FORM ZY-01-N	Microwave Circuit Design - EE523 - Fall 2000	DATE

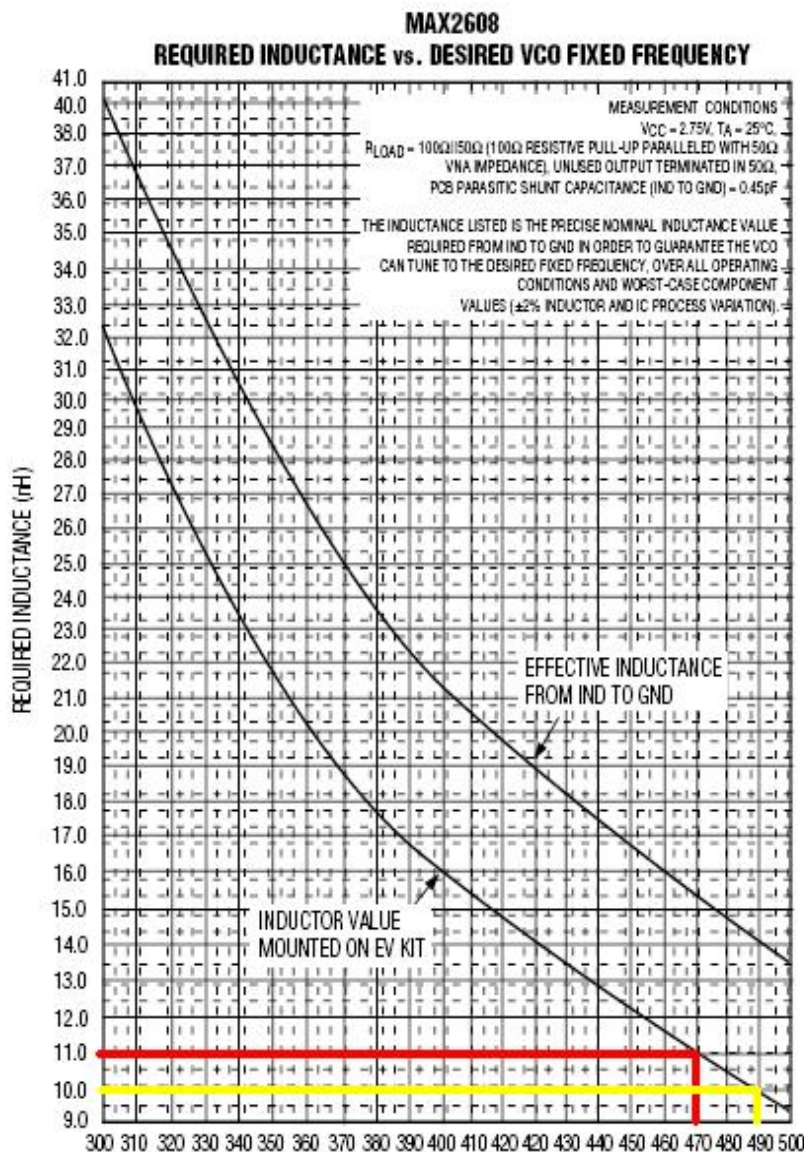
NORMALIZED IMPEDANCE AND ADMITTANCE COORDINATES



รูปที่ 3.19 Smith Chart

3.6 การเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำ ในการจูน Center Frequency ของไอซี MAX2608

สาเหตุที่เลือกค่า Inductance เท่ากับ 10 nH เนื่องจากเราต้องการจูน Center Frequency ให้ได้ค่าอยู่ในย่าน 470MHz-490MHz จากความสัมพันธ์ของค่าความถี่กับค่า Inductance ดังกราฟของไอซี MAX2608 ทำให้เราได้ค่า Inductance ที่สัมพันธ์กับความถี่ในย่านที่ต้องการคือ 10.0nH-11.0 nH ดังนั้นจึงเลือกค่า Inductance ที่มีค่าเท่ากับ 10.0 nH เนื่องจากค่าความถี่สูงสุดที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 490MHz

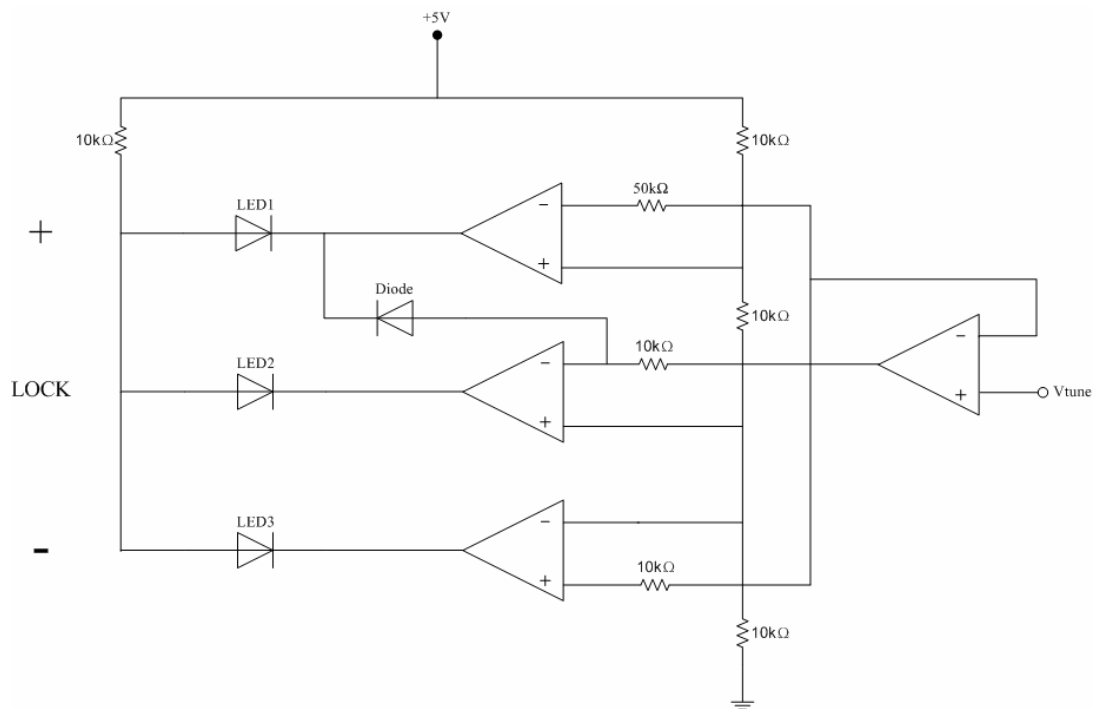


รูปที่ 3.20 แสดงกราฟค่าตัวเหนี่ยวนำในการเลือก Center Frequency

3.7 การออกแบบวงจรตรวจจับสถานะล็อก

การออกแบบวงจรตรวจจับสถานะล็อกนี้เพื่อจะทำหน้าที่ตรวจจับสภาวะการ Locked ของ เฟส โดยแสดงค่าเป็นหลอดไฟ LED 3 ดวง เมื่อเกิดสถานะล็อกหลอดไฟ LED ดวงกลางจะเป็นสีเขียว ถ้าหลอดไฟ LED ดวงแรกหรือดวงสุดท้ายเป็นสีเขียว แสดงว่าเกิดสถานะไม่ล็อกเกิดขึ้น เนื่องจาก แรงดันมีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป

จากรูปที่ 3.21 เราสามารถใช้โปรแกรม Prote199SE ในการออกแบบลายวงจรแผ่นทองแดงได้ ดังแสดงดังรูปที่ ก-2 ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.21 วงจรตรวจจับสถานะล็อก

3.8 การออกแบบและการทำงานของวงจร IC Dipswitch

วงจรสังเคราะห์ความถี่นี้ได้ออกแบบวงจรให้เป็นแบบเฟสล็อกคูลิป โดยมีลักษณะการทำงานแบบ Parallel input PLL Frequency Synthesizer Interface with Dual Modulus Prescalers คือมีการหารสองครั้ง ซึ่งจะมีความสะดวกในการกำหนดค่าความถี่ที่ทำการสังเคราะห์ ซึ่งทำได้โดยการสร้างสัญญาณเลขฐานสองป้อนเข้าที่ไอซีที่ขา N และ A เท่านั้น เนื่องจากการสังเคราะห์ความถี่ที่ต้องการนั้นสามารถสังเคราะห์ความถี่ได้ช่วงละ 19.53125kHz ฉะนั้นจึงได้เลือกค่า Crystal เท่ากับ 10 kHz มาเป็นตัวกำเนิดความถี่อ้างอิง โดยทำการป้อนความถี่นี้เข้าที่ขา 27 ของ IC Dipswitch หลังจากนั้นความถี่นี้จะถูกหารให้เหลือค่าเท่ากับ 19.53125kHz โดยการตั้งค่าตัวหารจากการป้อนสัญญาณเลขฐานสองที่ขา RA0,RA1และRA2 จะได้ผลหารดังแสดงในตารางที่ 1

RA2	RA1	RA0	ค่าตัวหาร
0	0	0	8
0	0	1	64
0	1	0	128
0	1	1	256
1	0	0	512
1	0	1	1024
1	1	0	1160
1	1	1	2048

ตารางที่ 3.8.1 การตั้งค่าตัวหารที่ขา RA2, RA1 และ RA0 ที่ IC Dipswitch (MC 145152)

จากตารางจะเห็นว่า การกำหนดตัวหารให้หารความถี่ 10MHz ให้เหลือ 19.53125 kHz ตัวหารจะต้องมีค่าเท่ากับ 512 ซึ่งจะต้องกำหนดให้ RA2 = 1, RA1 = 0 และ RA0 = 0 การกำหนดความถี่สามารถทำได้โดย การตั้ง Dipswitch ที่ป้อนสัญญาณเลขฐานสองเข้าที่ขา A0-A5 และ N0-N9 ซึ่งค่าความถี่สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$F_{VCO} = ((N * P) + A) * Sp \quad \dots\dots\dots (ก)$$

โดยกำหนดให้

F_{VCO} = ค่าความถี่ที่ต้องการสังเคราะห์

N = ค่าของการกำหนดการสร้างสัญญาณเลขฐานสองที่ขา N

P = ค่าของตัวหาร (Prescalers)

A = ค่าของการกำหนดการสร้างสัญญาณเลขฐานสองที่ขา A

Sp = ช่วงห่างของแต่ละความถี่

จากสูตรจะเห็นว่ามีความถี่อยู่สองตัวคือ P และ Sp โดย P คือค่าตัวหารจากวงจรหารภายนอก ในที่นี้ใช้ IC MC12032A9 ตั้งค่าตัวหารเท่ากับ 64 ส่วนค่า Sp เป็นค่าของช่วงห่างแต่ละความถี่ ซึ่งเท่ากับ 19.53125 kHz สมมติว่าต้องการสังเคราะห์ความถี่ 470.00 MHz เราสามารถคำนวณหาค่าของ N และ A ดังนี้

จากสมการ (ก) กำหนดว่า $F_{VCO} = ((N * P) + A) * Sp$

เมื่อ $F_{VCO} = 470.00 \text{ MHz}$

P = 64

Sp = 19.53125 kHz

ทำการแทนค่าตัวแปรในสมการจะได้

$$470.00 \times 10^6 = ((N \times 64) + A) \times 19.53125 \times 10^3$$

$$24064 = (N \times 64) + A \quad \#(1)$$

จากสมการที่ (1) จะทำการหาค่า N ก่อนดังนี้

$$24064 = N \times 64$$

$$N = 376 \quad \#(2)$$

จากสมการที่ (2) จะได้ค่า $N = 376$ นำไปแทนในสมการ (1) เพื่อหาค่า A ได้ดังนี้

$$24064 = (470 \times 64) + A$$

$$A = 24064 - 24064$$

$$A = 0 \quad \#(3)$$

จากสมการ (2) และ (3) จะได้ค่า $N = 376$ และค่า $A = 0$

จากค่า $N = 376$ ทำการแปลงค่า N ให้เป็นเลขฐานสองได้เท่ากับ 0101111000 ซึ่งตรงกับตำแหน่งของขา $N9, N8, N7, N6, N5, N4, N3, N2, N1$ และ $N0$ ส่วนค่าของ A ที่มีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อทำการแปลงให้เป็นเลขฐานสองจะเท่ากับ 000000 ซึ่งตรงกับตำแหน่งขาของ $A5, A4, A3, A2, A1$ และ $A0$ ส่วนวิธีการปรับ Dipswitch เพื่อตั้งค่าความถี่ที่จะทำการสังเคราะห์นั้น ได้แสดงไว้ดังในภาคผนวก ข

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) ที่ย่านความถี่ 470 MHz

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำวงจรทั้งหมดที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมาประกอบเข้าเป็นเครื่องสังเคราะห์ความถี่สูงที่ย่านความถี่ 470 MHz แล้วเชื่อมต่อกับเครื่อง SPECTRUM ANALYZER เพื่อทำการวัดสัญญาณความถี่ และใช้เครื่อง OSCILLOSCOPE ในการจับสัญญาณดิซี และใช้เครื่อง DC POWER SUPPLY ในการจ่ายไฟดิซีโดยมีการเชื่อมต่อวงจรและอุปกรณ์ต่างๆดังรูป



รูปที่ 4.1 SPECTRUM ANALYZER

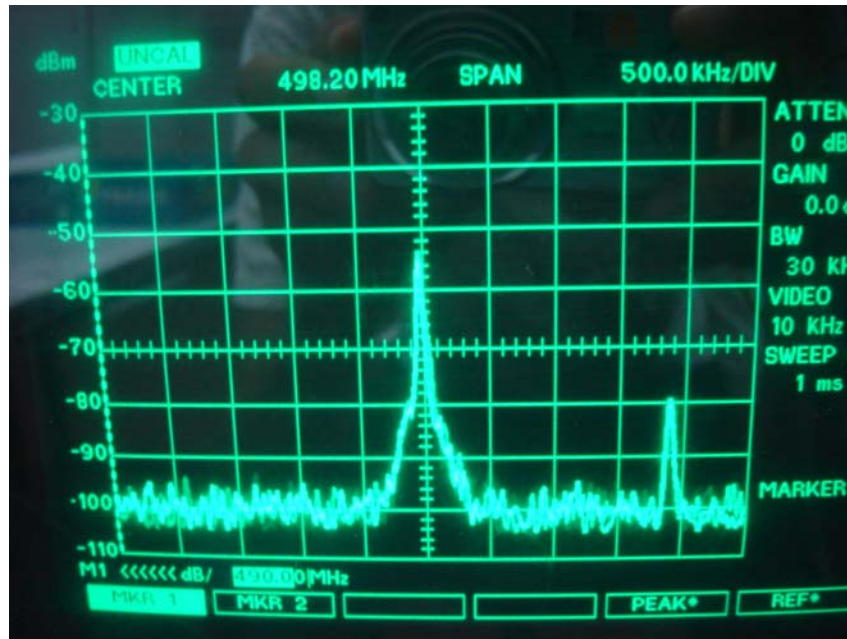


រូបភាព 4.2 OSCILLOSCOPE

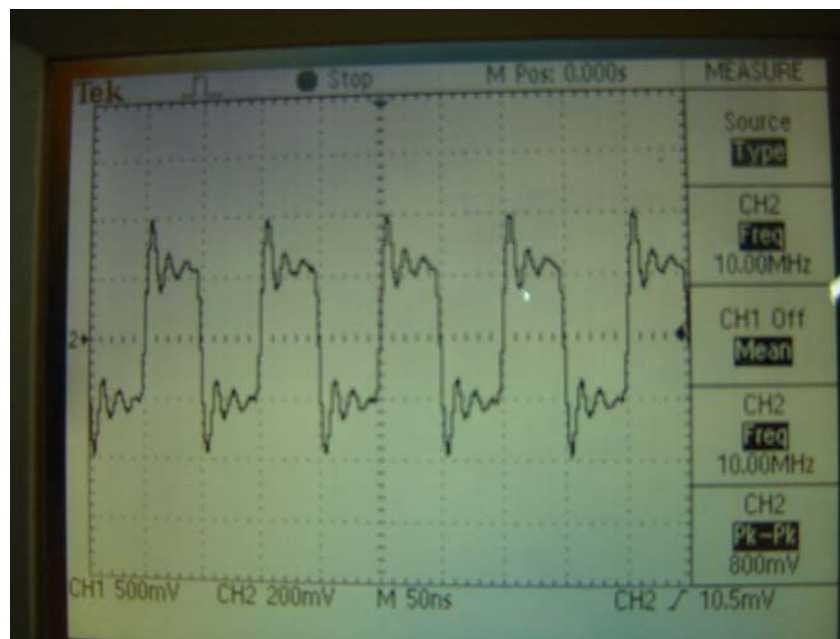


រូបភាព 4.3 DC POWER SUPPLY

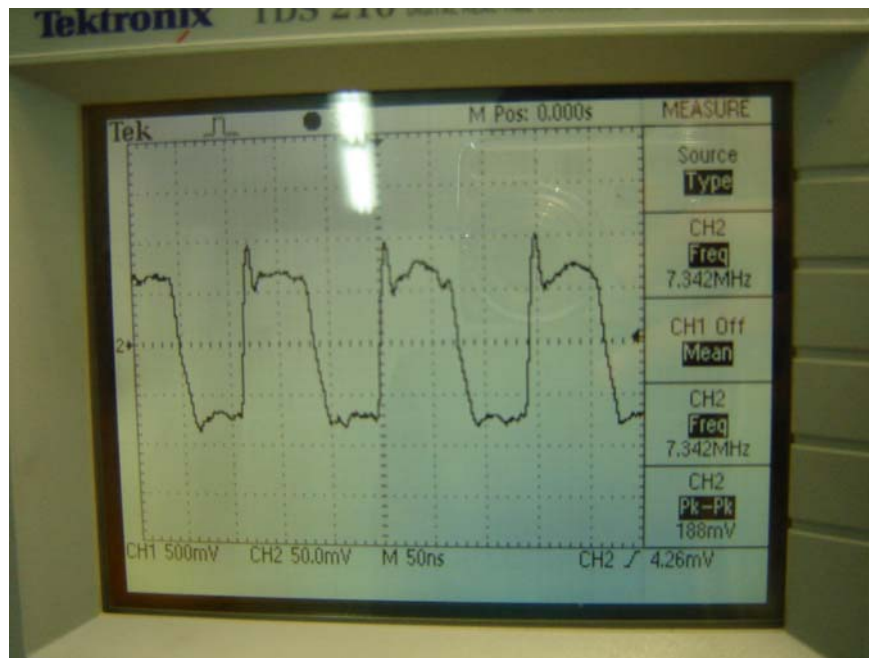
เริ่มต้นจากวงจรวงจรแกว่งความถี่ด้วยแรงดันจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่พาหะทำการเปรียบเทียบเฟสที่วงจรเปรียบเทียบเฟสกับความถี่อ้างอิง



รูปที่ 4.4 แสดงเอาต์พุตที่ออกจากระบบแกว่งความถี่ด้วยแรงดัน



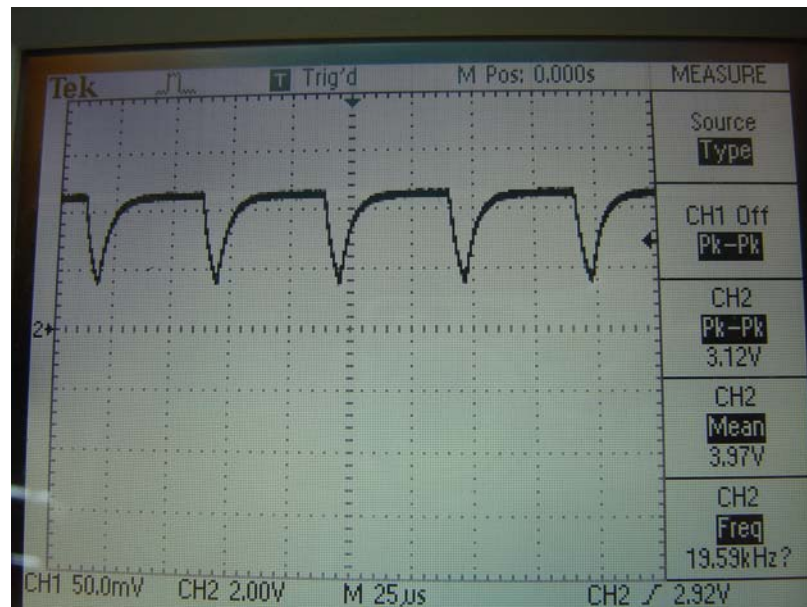
รูปที่ 4.5 แสดงความถี่อ้างอิงที่ 10MHz



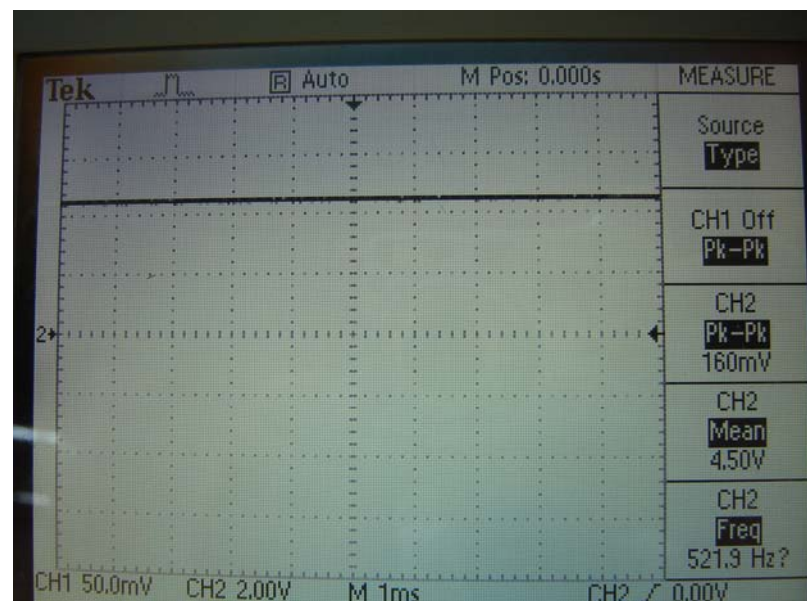
รูปที่ 4.6 แสดงเอาต์พุตที่ได้จากตัวหาร

เราได้ศึกษาภาวะการลือกของรูปโดยแบ่งเป็น 2 ภาวะ

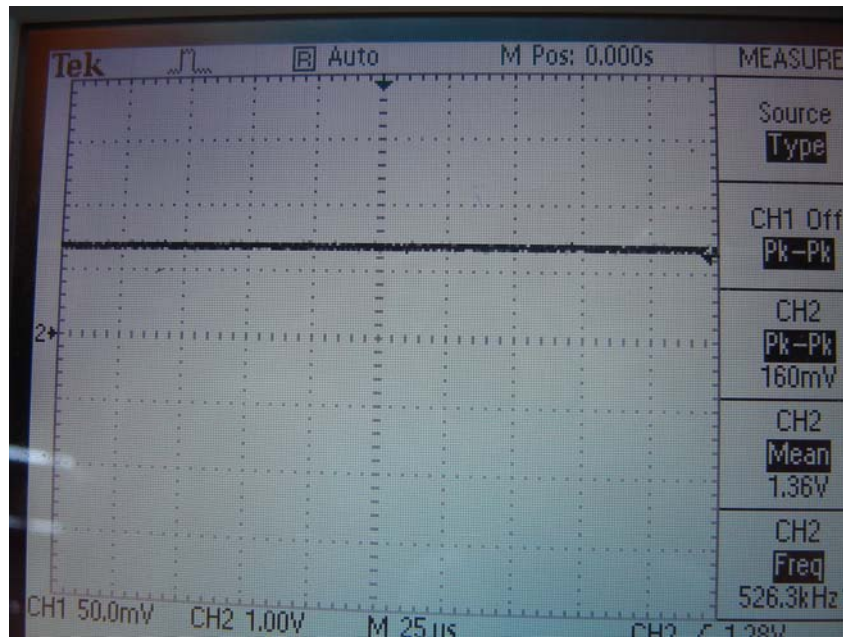
1.ภาวะลือก ความถี่ที่ได้จะมีความเสถียรไม่กวัดแกว่งสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองผ่านต่ำเป็นแรงดันกระแสตรงค่าหนึ่งสัญญาณขาออกที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้



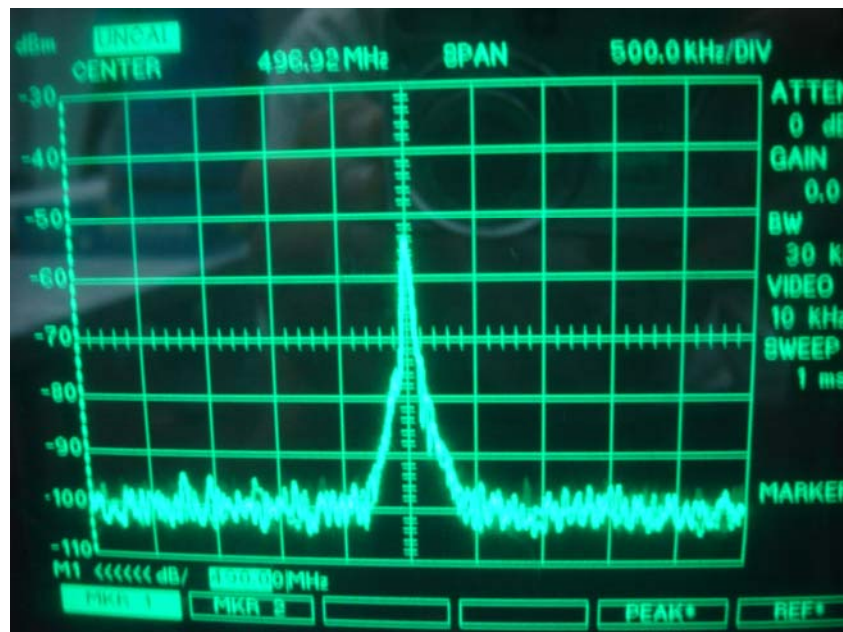
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ ขณะลือก



รูปที่ 4.8 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_R ขณะลือก

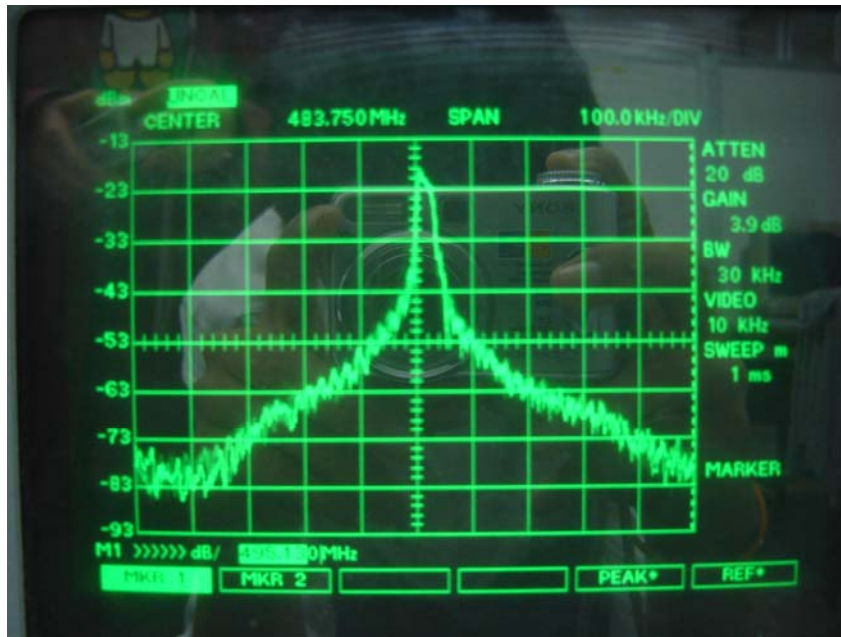


รูปที่ 4.9 แสดงเอาต์พุตที่ออกจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านขณะล๊อค

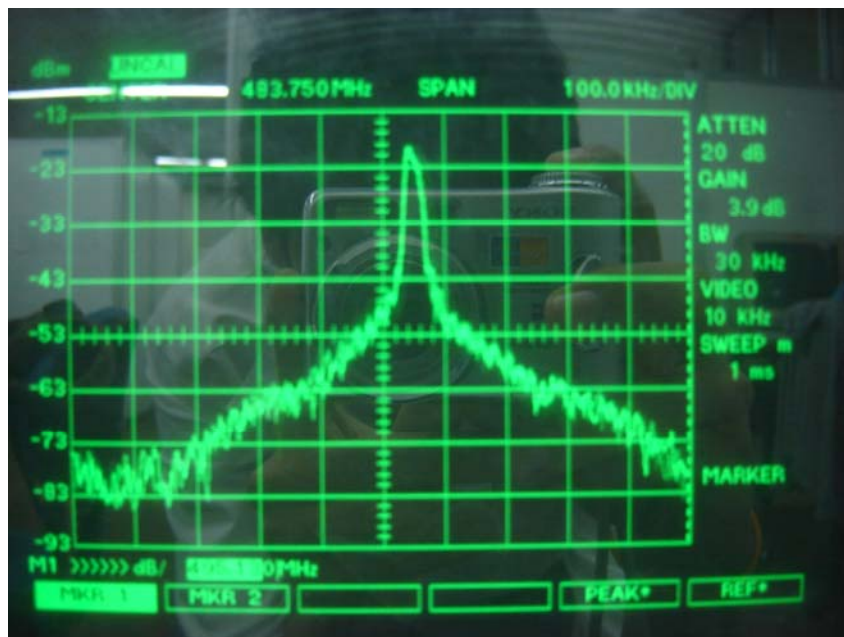


รูปที่ 4.10 แสดงสัญญาณที่ออกจากวงจรเฟสล๊อครูปเมื่อเกิดการล๊อค

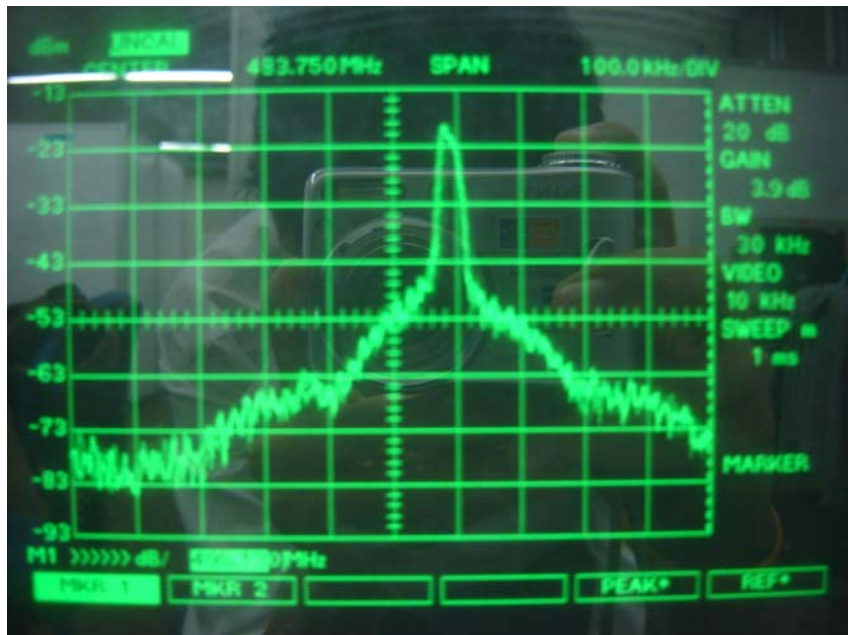
กรณีเมื่อศึกษาสภาวะการถือของเฟสล็อกูปโดยการหารความถี่ด้วย A ทำการกำหนดความถี่ CENTER และการ SPAN ให้คงที่



รูปที่ 4.11 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร A

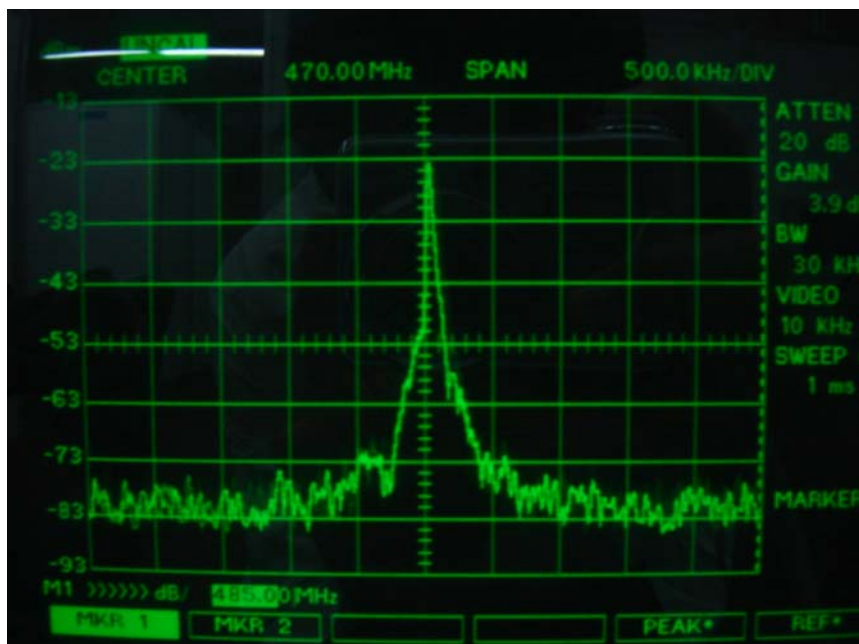


รูปที่ 4.12 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร A

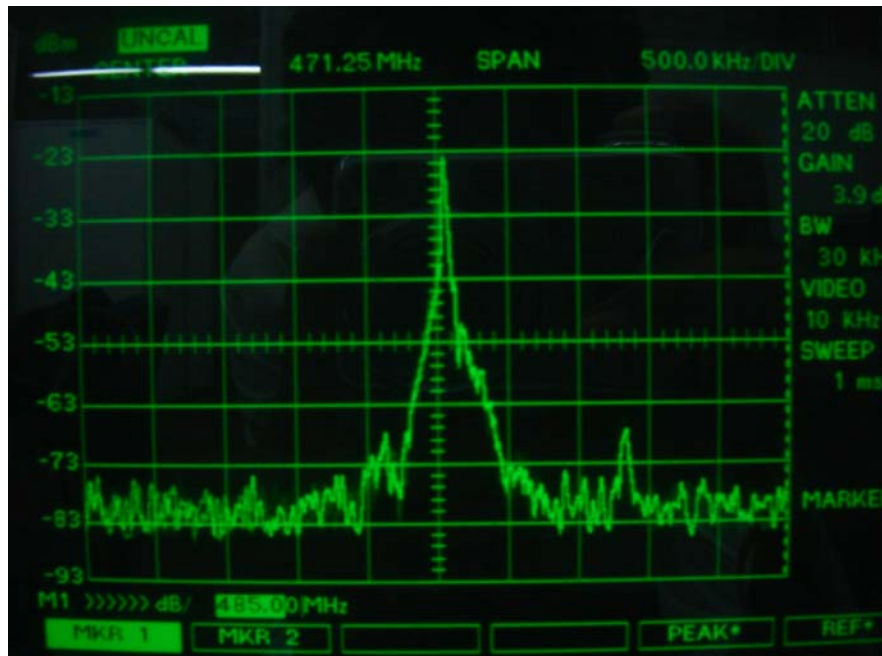


รูปที่ 4.13 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร A

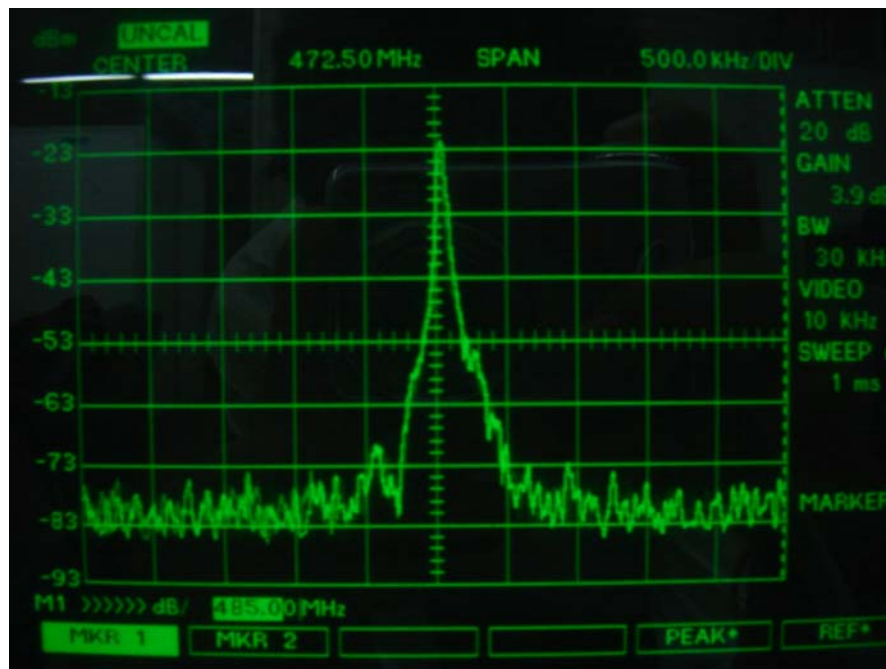
กรณีเมื่อศึกษาสภาวะการลือกของเฟสล็อกกูบโดยการหารความถี่ด้วย N ทำการกำหนดความถี่ในการ SPAN ให้คงที่



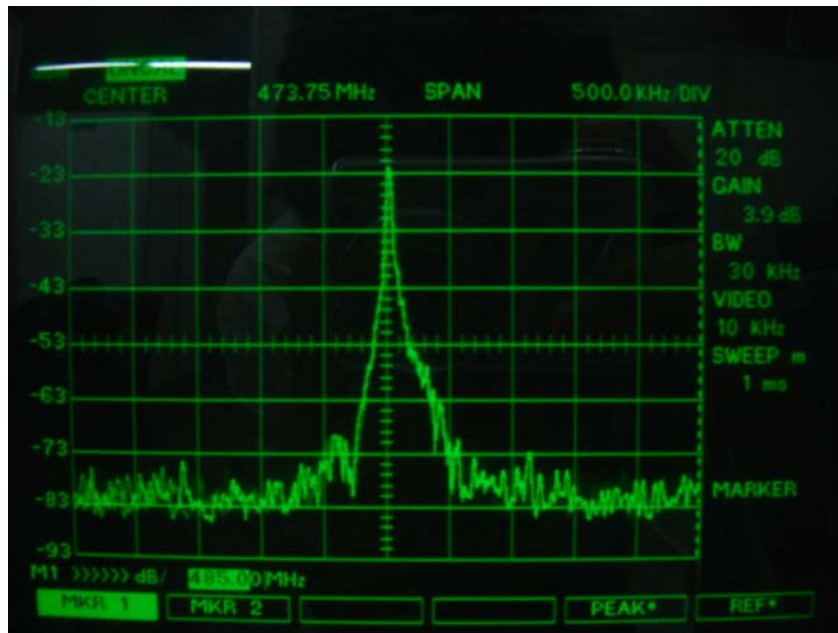
รูปที่ 4.14 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร N



รูปที่ 4.15 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร N

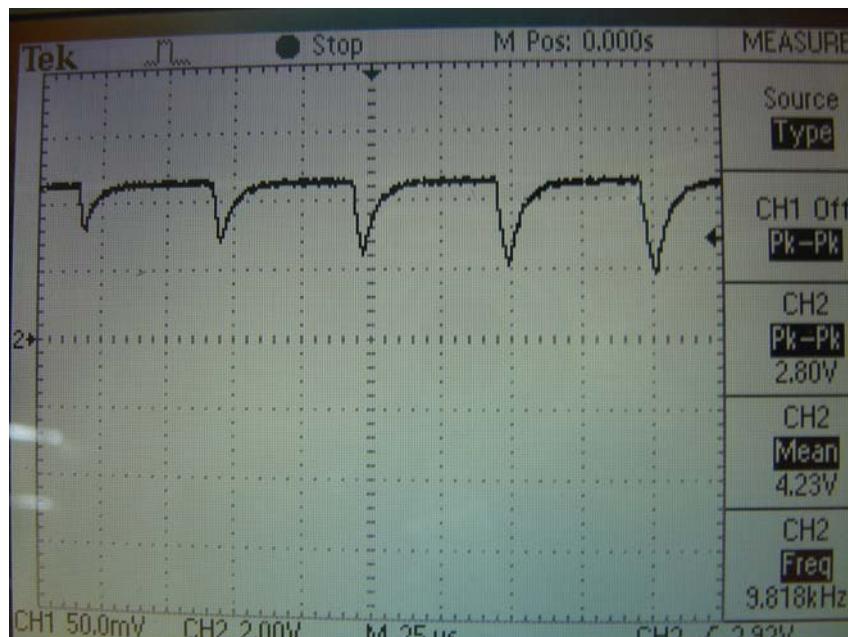


รูปที่ 4.16 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร N

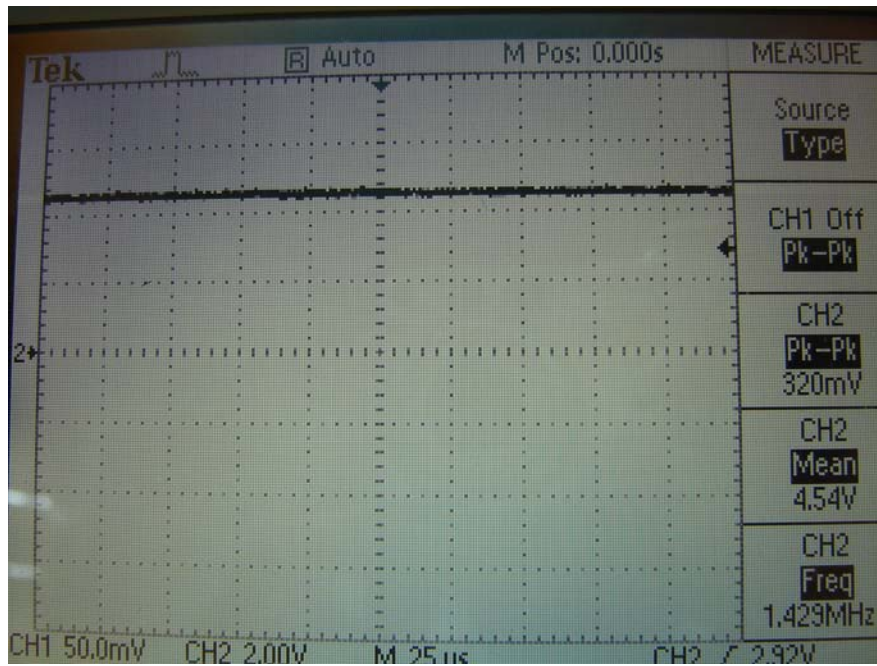


รูปที่ 4.17 แสดงความถี่ที่ได้จากการหาร N

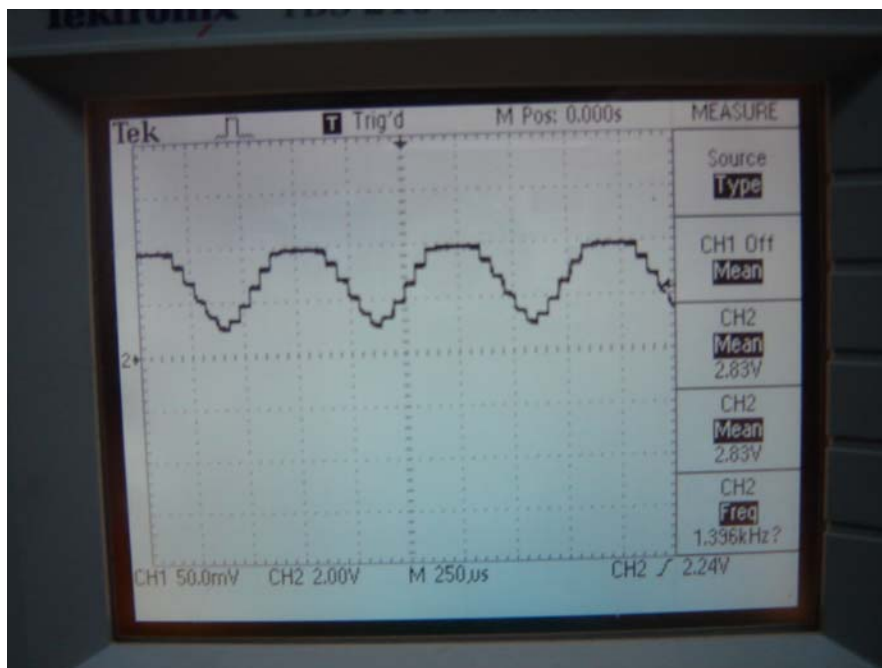
2. กรณีเมื่อเกิดการไม่ลื่นของเฟสล็อก ความถี่ที่ได้จะไม่มีค่าเสถียร โดยจะมีการกวัดแกว่งในย่านสัญญาณขาออกของวงจรกรองผ่านต่ำ



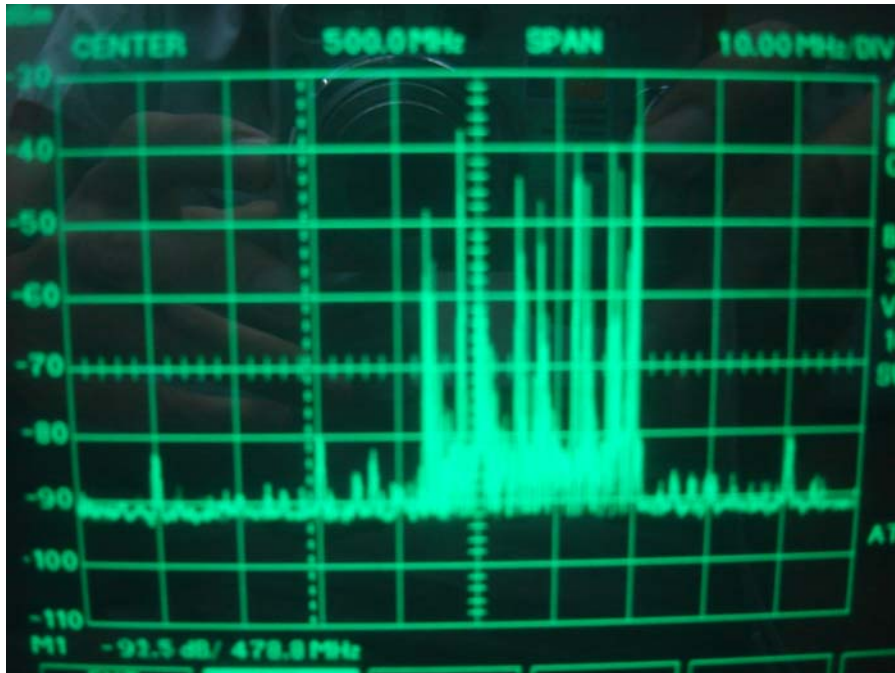
รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณที่ออกจาก ϕ_v ขณะไม่ลื่น



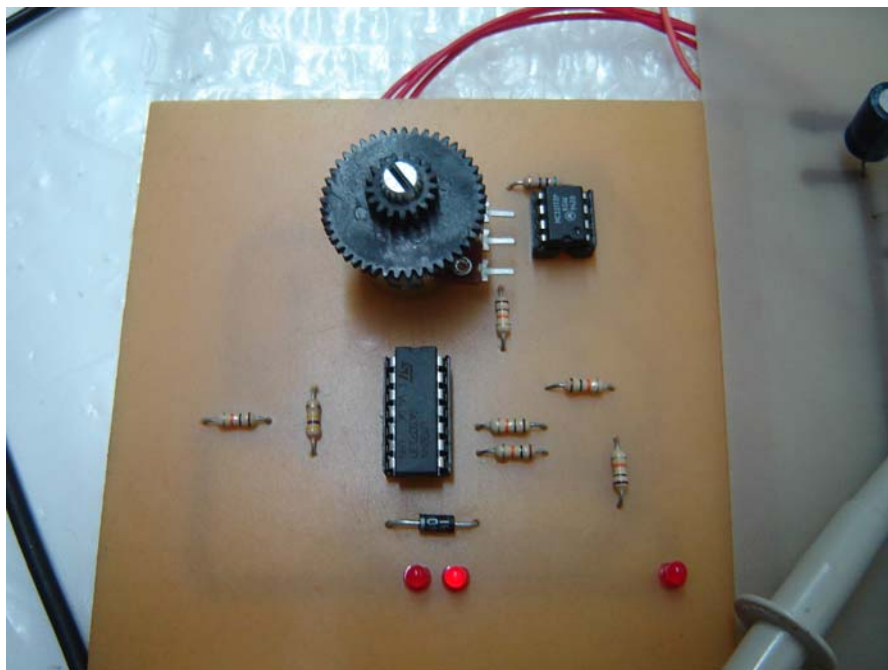
รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณที่ออกจาก φ_R ขณะไม่ล๊อค



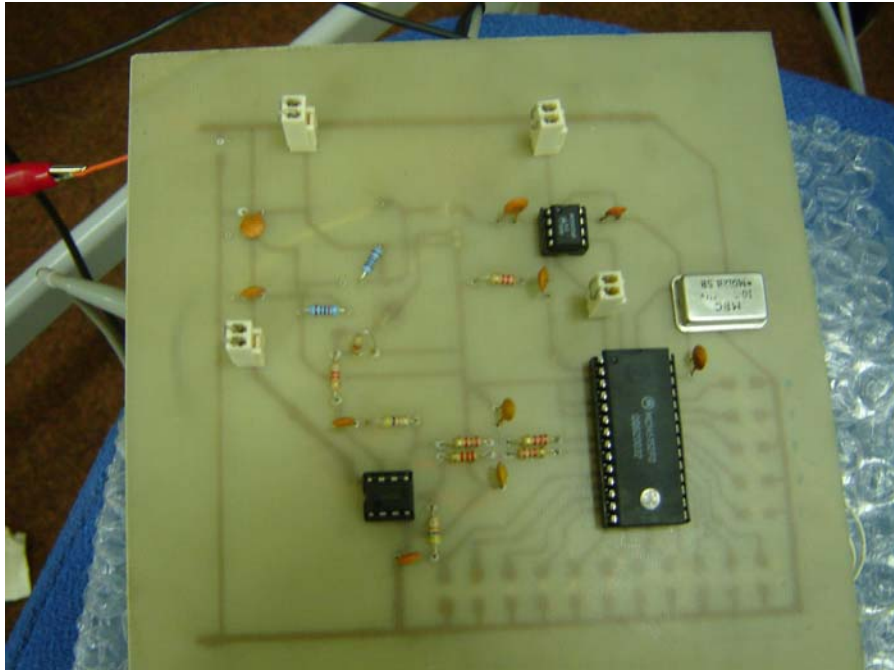
รูปที่ 4.20 แสดงเอาต์พุตที่ออกจากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านขณะไม่ล๊อค



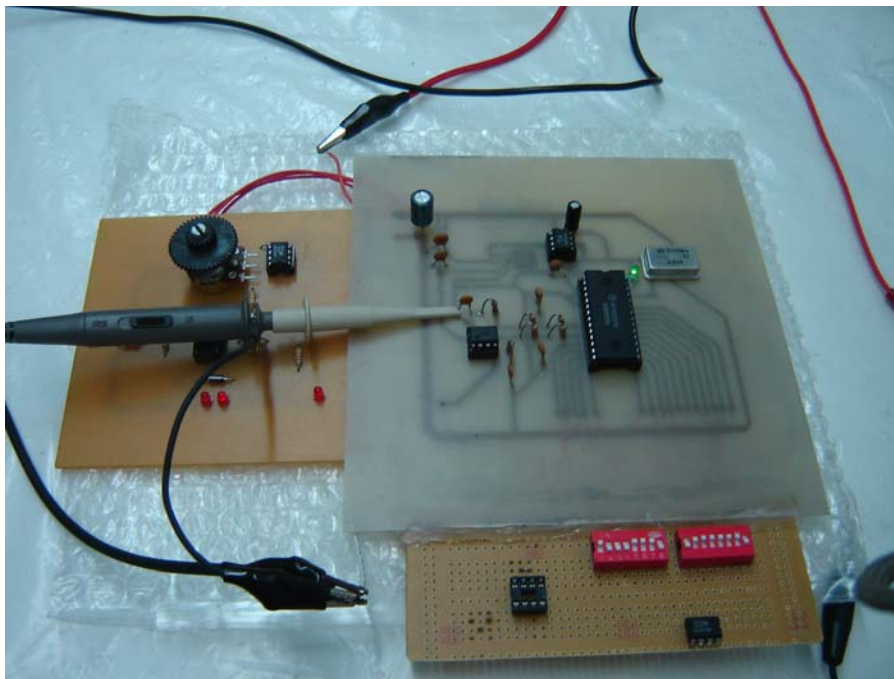
รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณที่ออกจากวงจรเฟสล็อกเมื่อเกิดการไม่ล็อก



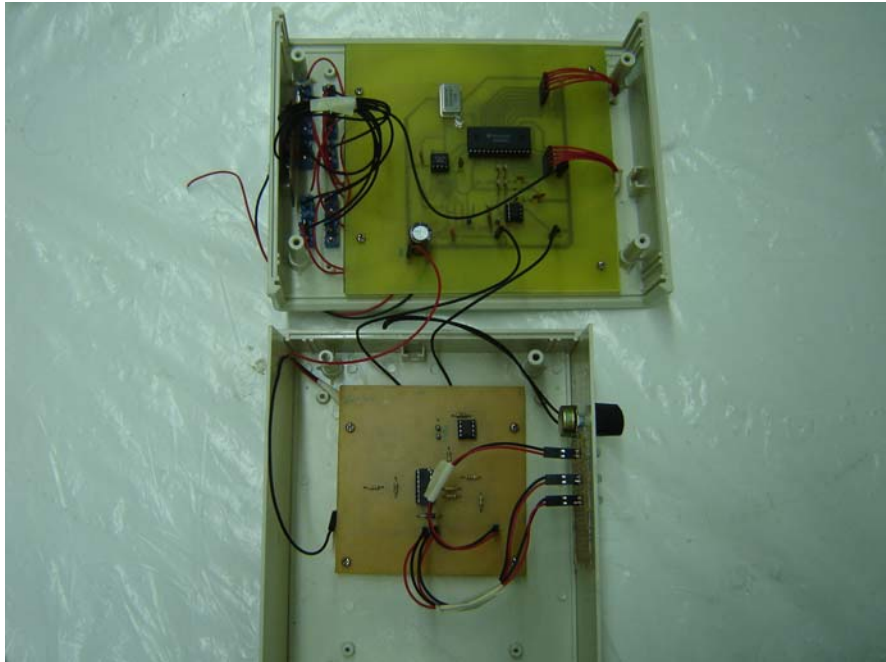
รูปที่ 4.22 แสดงวงจรตรวจจับสถานะล็อก



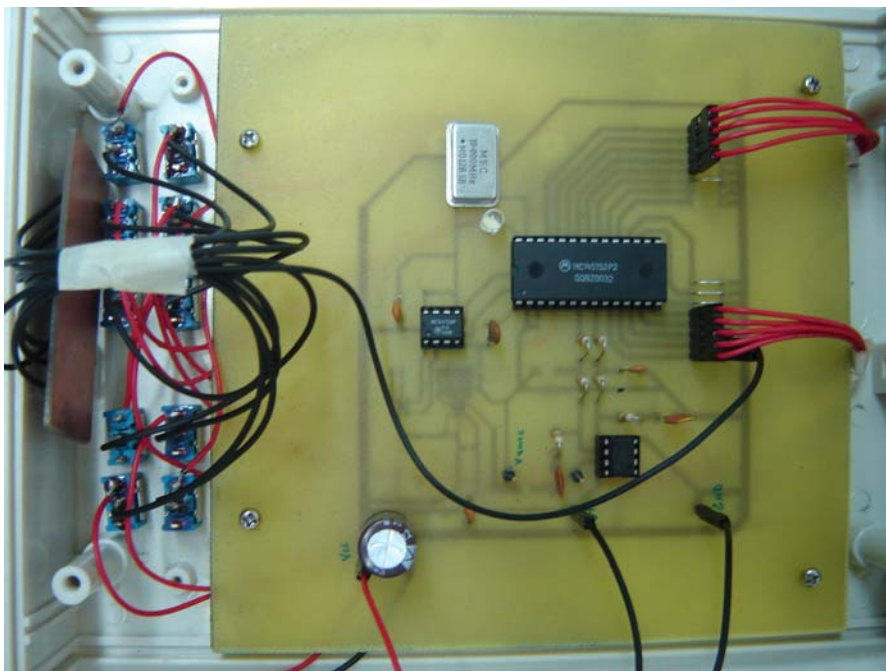
รูปที่ 4.23 แสดงวงจรสังเคราะห์ความถี่



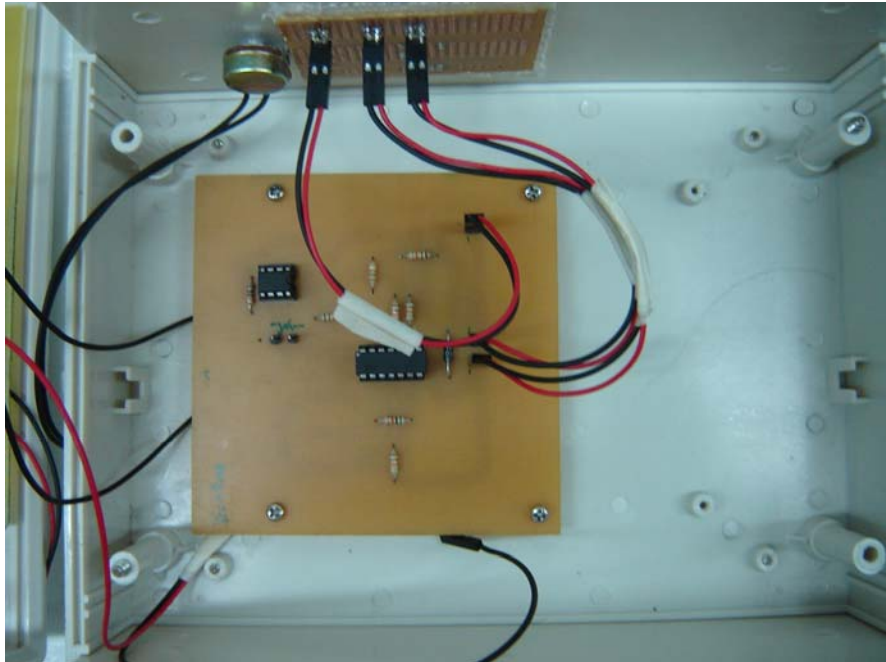
รูปที่ 4.24 แสดงวงจร โดยรวมทั้งหมด



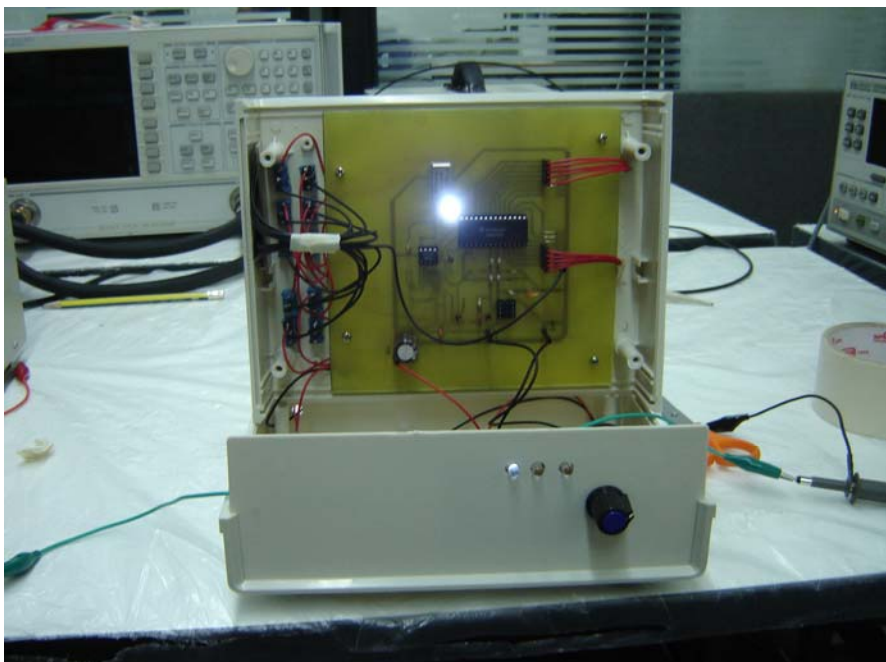
รูปที่ 4.25 แสดงวงจรภายในกล่อง



รูปที่ 4.26 แสดงวงจรภายในกล่องด้านวงจรสังเคราะห์ความถี่



รูปที่ 4.27 แสดงวงจรภายในกล่องด้านวงจรตรวจจับสถานะล็อก



รูปที่ 4.28 แสดงวงจรโดยรวมทั้งหมด



รูปที่ 4.29 แสดงภาพการจ่ายไฟประมาณ 5 โวลต์ให้กับวงจร



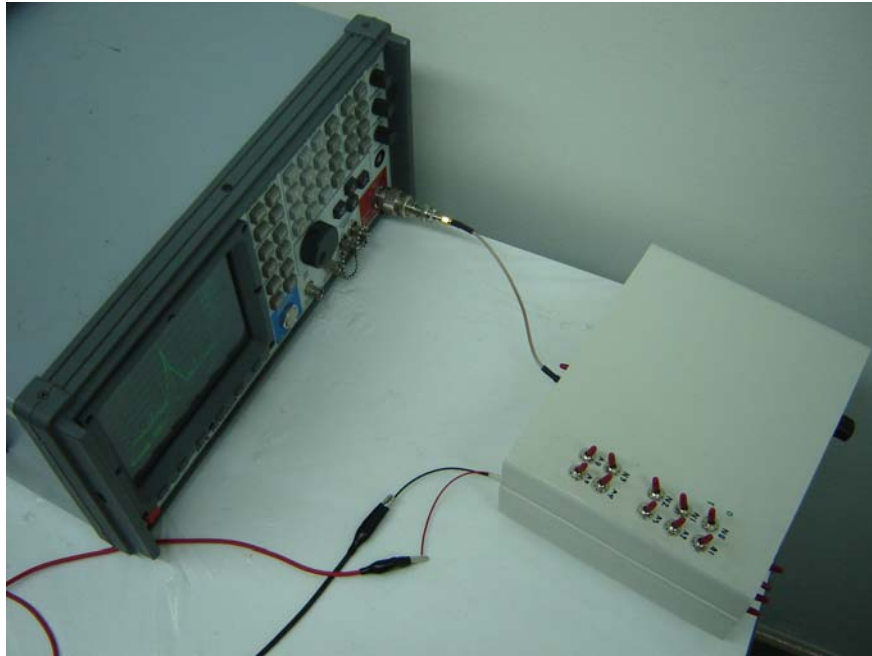
รูปที่ 4.30 แสดงภาพการเกิดสภาวะล็อก



รูปที่ 4.31 แสดงภาพการเกิดสภาวะล็อก



รูปที่ 4.32 แสดงภาพด้านหลังของชิ้นงาน



รูปที่ 4.33 แสดงภาพจากด้านบนของชิ้นงาน

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำงานโดยรวมของระบบทั้งหมด โดยอธิบายส่วนประกอบของเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ และผลการทดลองโดยรวม รวมทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อจำกัดในการทดลอง

5.1 ส่วนประกอบเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ย่าน 470-490 MHz

เครื่องส่งเคราะห์ความถี่ย่าน 470-490 MHz ประกอบด้วย

1. ภาคกำเนิดความถี่อ้างอิง ซึ่งจะมาจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์
2. วงจรแกว่งควบคุมโดยแรงดัน (VCO) ซึ่งสร้างความถี่ตั้งแต่ 470-490 MHz
3. ภาคเปรียบเทียบเฟส
4. ภาค Low pass filter
5. ภาคตรวจสอบภาวะล็อก

5.2 คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องส่งเคราะห์ความถี่ย่าน 470-490 MHz

1. การส่งเคราะห์ความถี่

การส่งเคราะห์ความถี่ช่วงละ	: 19531.25 Hz
ความถี่ฐาน	: 10 MHz
ความถี่อ้างอิง	: 19531.25 Hz
ระดับของสัญญาณขาออก	: -23 dBm
จำนวนช่องสัญญาณ	: 1000

2. การแสดงผล

การแสดงผลภาวะการทำงาน	: สัญญาณล็อกทางความถี่
-----------------------	------------------------

3. ขนาดของเครื่อง

กว้าง	: 17 cm
ยาว	: 21 cm
สูง	: 8 cm
น้ำหนัก	: 0.5 kg

5.3 ปัญหาที่พบในขั้นตอนการทำงาน

1. เนื่องจากไอซีที่ใช้มีขนาดเล็กมาก อีกทั้งผู้ปฏิบัติการขาดความชำนาญในการบัดกรีจึงทำให้ไอซีบางตัวไม่สามารถใช้งานได้
2. ไอซีที่ใช้ส่วนใหญ่หาซื้อได้ยากและไม่มีขายในเมืองไทย จึงทำให้ต้องเสียเวลาในการสั่งซื้อจากต่างประเทศ และยังมีราคาค่อนข้างสูง
3. ไอซี VCO ที่ใช้ส่วนใหญ่ไม่ได้มีค่าตามคุณสมบัติในdata sheet ทำให้ยากในการออกแบบและต้องเสียเวลาเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการ
4. ไอซี VCO ที่ใช้เนื่องจากมีราคาถูกและมีความเพี้ยนสูง ทำให้มีปัญหาในการล็อกความถี่ จึงทำให้ต้องใช้การจูนช่วยในการล็อกและต้องออกแบบวงจรตรวจสอบภาวะล็อก ทำให้ต้องใช้เวลานาน
5. ขาดความเข้าใจในคุณสมบัติ และการนำไปใช้งานของไอซีบางตัวทำให้วงจรที่ออกแบบมาใช้งานไม่ได้

5.4 ข้อจำกัดของโครงการ

1. ไอซีส่วนใหญ่ที่ใช้ในโครงการนี้หาซื้อได้ยาก และ VCO ที่มีคุณสมบัติที่ดีทำงานที่ความถี่ในย่านนี้ มีราคาแพง จึงทำให้งบประมาณที่ใช้มีไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงการนี้ออกมาสมบูรณ์เท่าที่ควร
2. ไม่มีเครื่องมือที่ใช้ในการบัดกรีอุปกรณ์ขนาดเล็ก ทำให้ไอซีขนาดเล็กพังบ่อยซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองและเสียเวลา

5.5 ผลที่ได้จากโครงการนี้

1. ทำให้มีความรู้ความเข้าใจในหลักการทำงานของเฟสล็อกลูปและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตได้
2. ทำให้มีความรู้ในการออกแบบวงจรด้านความถี่วิทยุ(RF circuit design)
3. สามารถใช้งานเครื่องมือวัดทางด้านโทรคมนาคมได้
4. ได้เรียนรู้วิธีการออกแบบลายวงจร และขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์
5. มีความเข้าใจหลักการทำงาน และวิธีการออกแบบจากการศึกษาข้อมูลของไอซีแต่ละตัว

5.6 แนวทางการพัฒนาต่อไป

จากเครื่องสังเคราะห์ความถี่ที่ได้สร้างขึ้นมาและได้ทำการทดสอบพบว่าผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจตรงตามวัตถุประสงค์ แต่ยังคงมีปัญหาบางอย่างที่ต้องแก้ไขเนื่องมิงบประมาณและเวลาที่จำกัด อีกทั้งยังขาดประสบการณ์ในการทำงานจึงขอฝากไว้เพื่อการพัฒนาต่อไปด้วย

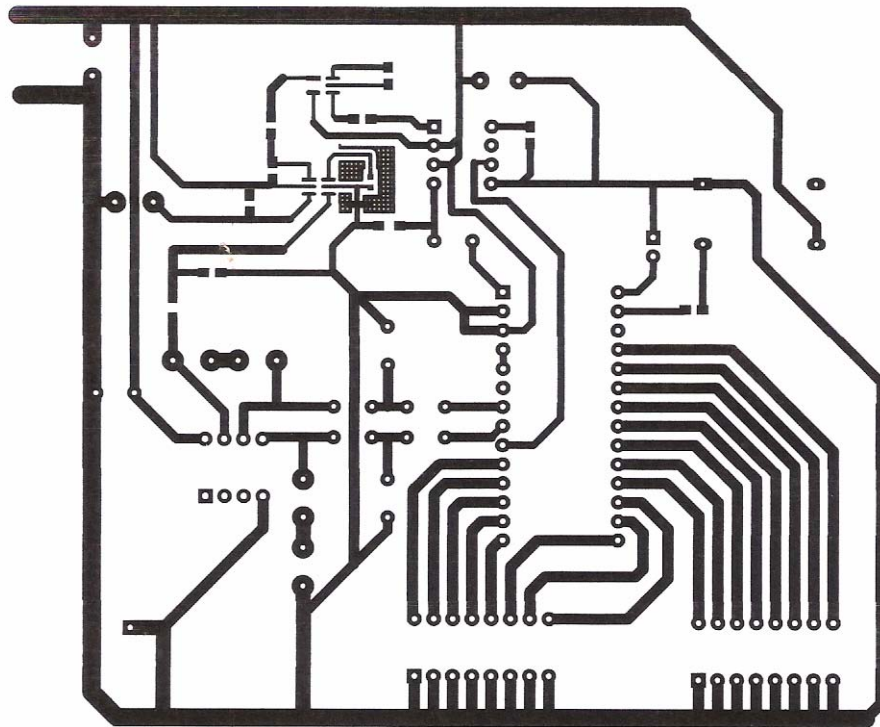
1. เอาท์พุทที่ได้มีกำลังต่ำ จึงควรเพิ่มวงจรขยายสัญญาณ เพื่อให้ขนาดของสัญญาณเพียงพอและง่ายต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้
2. จากการปรับเปลี่ยนความถี่ยังต้องอาศัยการสวิตซ์ด้วยมือ และต้องศึกษาค่าของสวิตซ์เพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการ ทำให้มีความยุ่งยากในการใช้งาน ซึ่งการเพิ่มเติมภาคประมวลผลและแสดงค่าความถี่ผ่านจอLCD จะทำให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น
3. การเลือกความถี่ยังต้องอาศัยการจูนช่วยทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งานเนื่องมาจาก VCO ที่ใช้มีคุณภาพต่ำ และยังมี noise สูง ซึ่งการใช้ไอซีที่มีคุณภาพจะทำให้ผลเป็นตามต้องการมากขึ้น

บรรณานุกรม

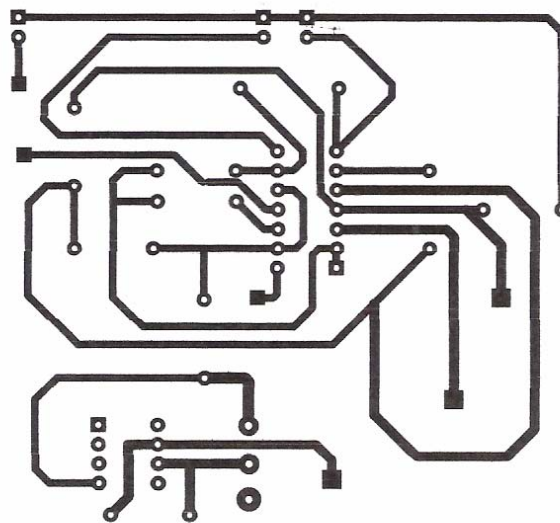
- [1] คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์, ระบบอิเล็กทรอนิกส์สื่อสาร (Electronics Communication Systems), พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: 2547.
- [2] นายชาญชัย ทองโสภาก, เครื่องส่งวิทยุความถี่ VHF, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ: 2540.
- [3] Guillermo Gonzalez, MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIFERS, 2nd Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1984.
- [4] Chris Bowick, RF Circuit Design, 1st Edition, EIGHTH PRINTING, 1990.
- [5] Phase Locked Loop from www.lansdale.com/Articles/an535.pdf
- [6] MAX2608. 45 MHz to 650 MHz, Integrated IF VCOs with Differential Output, Available from:
<http://www.maxim.com>
- [7] MAX2632. VHF-to-Microwave,+3V, General- Purpose Amplifiers, Available from
<http://www.maxim.com>
- [8] MC145152P2. PLL Frequency Synthesizers (CMOS), Available from:
<http://www.freescale.com/epp>
- [9] MC12032. 2.0 GHz Dual Modulus Prescaler, Available from: <http://Design-NET.com>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
รายละเอียดลายวงจรแผ่นทองแดง



รูปที่ ก-1 ลายวงจรเฟสลือกल्प



รูปที่ ก-2 ลายวงจรตรวจจับสภาวะลือก

ภาคผนวก ข
รายละเอียดของการกำหนดความถี่โดยการ Dipswitch

Channel = 0, N = 376, A = 0 : Frequency = 470.000
Channel = 1, N = 376, A = 1 : Frequency = 470.019
Channel = 2, N = 376, A = 2 : Frequency = 470.038
Channel = 3, N = 376, A = 3 : Frequency = 470.057
Channel = 4, N = 376, A = 4 : Frequency = 470.076
Channel = 5, N = 376, A = 5 : Frequency = 470.095
Channel = 6, N = 376, A = 6 : Frequency = 470.114
Channel = 7, N = 376, A = 7 : Frequency = 470.133
Channel = 8, N = 376, A = 8 : Frequency = 470.152
Channel = 9, N = 376, A = 9 : Frequency = 470.171
Channel = 10, N = 376, A = 10: Frequency = 470.190
Channel = 11, N = 376, A = 11: Frequency = 470.209
Channel = 12, N = 376, A = 12: Frequency = 470.228
Channel = 13, N = 376, A = 13: Frequency = 470.247
Channel = 14, N = 376, A = 14: Frequency = 470.266
Channel = 15, N = 376, A = 15: Frequency = 470.285
Channel = 16, N = 376, A = 16: Frequency = 470.304
Channel = 17, N = 376, A = 17: Frequency = 470.323
Channel = 18, N = 376, A = 18: Frequency = 470.342
Channel = 19, N = 376, A = 19: Frequency = 470.361
Channel = 20, N = 376, A = 20: Frequency = 470.380
Channel = 21, N = 376, A = 21: Frequency = 470.399
Channel = 22, N = 376, A = 22: Frequency = 470.418
Channel = 23, N = 376, A = 23: Frequency = 470.437
Channel = 24, N = 376, A = 24: Frequency = 470.456
Channel = 25, N = 376, A = 25: Frequency = 470.475
Channel = 26, N = 376, A = 26: Frequency = 470.494
Channel = 27, N = 376, A = 27: Frequency = 470.513

Channel = 28, N = 376, A = 28: Frequency = 470.532
Channel = 19, N = 376, A = 29: Frequency = 470.551
Channel = 30, N = 376, A = 30: Frequency = 470.570
Channel = 31, N = 376, A = 31: Frequency = 470.589
Channel = 32, N = 376, A = 32: Frequency = 470.608
Channel = 33, N = 376, A = 33: Frequency = 470.627
Channel = 34, N = 376, A = 34: Frequency = 470.646
Channel = 35, N = 376, A = 35: Frequency = 470.665
Channel = 36, N = 376, A = 36: Frequency = 470.684
Channel = 37, N = 376, A = 37: Frequency = 470.703
Channel = 38, N = 376, A = 38: Frequency = 470.722
Channel = 39, N = 376, A = 39: Frequency = 470.741
Channel = 40, N = 376, A = 40: Frequency = 470.760
Channel = 41, N = 376, A = 41: Frequency = 470.779
Channel = 42, N = 376, A = 42: Frequency = 470.798
Channel = 43, N = 376, A = 43: Frequency = 470.817
Channel = 44, N = 376, A = 44: Frequency = 470.836
Channel = 45, N = 376, A = 45: Frequency = 470.855
Channel = 46, N = 376, A = 46: Frequency = 470.874
Channel = 47, N = 376, A = 47: Frequency = 470.893
Channel = 48, N = 376, A = 48: Frequency = 470.912
Channel = 49, N = 376, A = 49: Frequency = 470.931
Channel = 50, N = 376, A = 50: Frequency = 470.950
Channel = 51, N = 376, A = 51: Frequency = 470.969
Channel = 52, N = 376, A = 52: Frequency = 470.988
Channel = 53, N = 376, A = 53: Frequency = 471.007
Channel = 54, N = 376, A = 54: Frequency = 471.026
Channel = 55, N = 376, A = 55: Frequency = 471.045

Channel = 56, N = 376, A = 56: Frequency = 471.064
Channel = 57, N = 376, A = 57: Frequency = 471.083
Channel = 58, N = 376, A = 58: Frequency = 471.102
Channel = 59, N = 376, A = 59: Frequency = 471.121
Channel = 60, N = 376, A = 60: Frequency = 471.140
Channel = 61, N = 376, A = 61: Frequency = 471.159
Channel = 62, N = 376, A = 62: Frequency = 471.178
Channel = 63, N = 376, A = 63: Frequency = 471.197
Channel = 64, N = 377, A = 0 : Frequency = 471.216
Channel = 65, N = 377, A = 1 : Frequency = 471.235
Channel = 66, N = 377, A = 2 : Frequency = 471.254
Channel = 67, N = 377, A = 3 : Frequency = 471.273
Channel = 68, N = 377, A = 4 : Frequency = 471.292
Channel = 69, N = 377, A = 5 : Frequency = 471.311
Channel = 70, N = 377, A = 6 : Frequency = 471.330
Channel = 71, N = 377, A = 7 : Frequency = 471.349
Channel = 72, N = 377, A = 8 : Frequency = 471.368
Channel = 73, N = 377, A = 9 : Frequency = 471.387
Channel = 74, N = 377, A = 10: Frequency = 471.406
Channel = 75, N = 377, A = 11: Frequency = 471.425
Channel = 76, N = 377, A = 12: Frequency = 471.444
Channel = 77, N = 377, A = 13: Frequency = 471.463
Channel = 78, N = 377, A = 14: Frequency = 471.482
Channel = 79, N = 377, A = 15: Frequency = 471.501
Channel = 80, N = 377, A = 16: Frequency = 471.520
Channel = 81, N = 377, A = 17: Frequency = 471.539
Channel = 82, N = 377, A = 18: Frequency = 471.558
Channel = 83, N = 377, A = 19: Frequency = 471.577

Channel = 84, N = 377, A = 20: Frequency = 471.596
Channel = 85, N = 377, A = 21: Frequency = 471.615
Channel = 86, N = 377, A = 22: Frequency = 471.634
Channel = 87, N = 377, A = 23: Frequency = 471.653
Channel = 88, N = 377, A = 24: Frequency = 471.672
Channel = 89, N = 377, A = 25: Frequency = 471.691
Channel = 90, N = 377, A = 26: Frequency = 471.710
Channel = 91, N = 377, A = 27: Frequency = 471.729
Channel = 92, N = 377, A = 28: Frequency = 471.748
Channel = 93, N = 377, A = 29: Frequency = 471.767
Channel = 94, N = 377, A = 30: Frequency = 471.786
Channel = 95, N = 377, A = 31: Frequency = 471.805
Channel = 96, N = 377, A = 32: Frequency = 471.824
Channel = 97, N = 377, A = 33: Frequency = 471.843
Channel = 98, N = 377, A = 34: Frequency = 471.862
Channel = 99, N = 377, A = 35: Frequency = 471.881
Channel = 100, N = 377, A = 36: Frequency = 471.900
Channel = 101, N = 377, A = 37: Frequency = 471.919
Channel = 102, N = 377, A = 38: Frequency = 471.938
Channel = 103, N = 377, A = 39: Frequency = 471.957
Channel = 104, N = 377, A = 40: Frequency = 471.976
Channel = 105, N = 377, A = 41: Frequency = 471.995
Channel = 106, N = 377, A = 42: Frequency = 472.014
Channel = 107, N = 377, A = 43: Frequency = 472.033
Channel = 108, N = 377, A = 44: Frequency = 472.052
Channel = 109, N = 377, A = 45: Frequency = 472.071
Channel = 110, N = 377, A = 46: Frequency = 472.090
Channel = 111, N = 377, A = 47: Frequency = 472.109

Channel = 112, N = 377, A = 48: Frequency =472.128
Channel = 113, N = 377, A = 49: Frequency =472.147
Channel = 114, N = 377, A = 50: Frequency =472.166
Channel = 115, N = 377, A = 51: Frequency =472.185
Channel = 116, N = 377, A = 52: Frequency =472.204
Channel = 117, N = 377, A = 53: Frequency =472.223
Channel = 118, N = 377, A = 54: Frequency =472.242
Channel = 119, N = 377, A = 55: Frequency =472.261
Channel = 120, N = 377, A = 56: Frequency =472.280
Channel = 121, N = 377, A = 57: Frequency =472.299
Channel = 122, N = 377, A = 58: Frequency =472.318
Channel = 123, N = 377, A = 59: Frequency =472.337
Channel = 124, N = 377, A = 60: Frequency =472.356
Channel = 125, N = 377, A = 61: Frequency =472.375
Channel = 126, N = 377, A = 62: Frequency =472.394
Channel = 127, N = 377, A = 63: Frequency =472.413
Channel = 128, N = 378, A = 0: Frequency =472.432
Channel = 129, N = 378, A = 1: Frequency =472.451
Channel = 130, N = 378, A = 2: Frequency =472.470
Channel = 131, N = 378, A = 3: Frequency =472.489
Channel = 132, N = 378, A = 4: Frequency =472.508
Channel = 133, N = 378, A = 5: Frequency =472.527
Channel = 134, N = 378, A = 6: Frequency =472.546
Channel = 135, N = 378, A = 7: Frequency =472.565
Channel = 136, N = 378, A = 8: Frequency =472.584
Channel = 137, N = 378, A = 9: Frequency =472.603
Channel = 138, N = 378, A = 0: Frequency =472.622
Channel = 139, N = 378, A = 11: Frequency =472.641

Channel = 140, N = 378, A = 12: Frequency =472.660
Channel = 141, N = 378, A = 13: Frequency =472.679
Channel = 142, N = 378, A = 13: Frequency =472.698
Channel = 143, N = 378, A = 15: Frequency =472.717
Channel = 144, N = 378, A = 16: Frequency =472.736
Channel = 145, N = 378, A = 17: Frequency =472.755
Channel = 146, N = 378, A = 18: Frequency =422.774
Channel = 147, N = 378, A = 19: Frequency =472.793
Channel = 148, N = 378, A = 20: Frequency =472.812
Channel = 149, N = 378, A = 21: Frequency =472.831
Channel = 150, N = 378, A = 22: Frequency =472.850
Channel = 151, N = 378, A = 23: Frequency =472.869
Channel = 152, N = 378, A = 24: Frequency =472.888
Channel = 153, N = 378, A = 25: Frequency =472.907
Channel = 154, N = 388, A = 26: Frequency =472.926
Channel = 155, N = 378, A = 27: Frequency =472.945
Channel = 156, N = 378, A = 28: Frequency =472.964
Channel = 157, N = 378, A = 29: Frequency =472.983
Channel = 158, N = 378, A = 30: Frequency =473.002
Channel = 159, N = 378, A = 31: Frequency =473.021
Channel = 160, N = 378, A = 32: Frequency =473.040
Channel = 161, N = 378, A = 33: Frequency =473.059
Channel = 162, N = 378, A = 34: Frequency =473.078
Channel = 163, N = 378, A = 35: Frequency =473.097
Channel = 164, N = 378, A = 36: Frequency =473.116
Channel = 165, N = 378, A = 37: Frequency =473.135
Channel = 166, N = 378, A = 38: Frequency =473.154
Channel = 167, N = 378, A = 39: Frequency =473.173

Channel = 168, N = 378, A = 40: Frequency =473.192
Channel = 169, N = 378, A = 41: Frequency =473.211
Channel = 170, N = 378, A = 42: Frequency =473.230
Channel = 171, N = 378, A = 43: Frequency =473.249
Channel = 172, N = 378, A = 44: Frequency =473.268
Channel = 173, N = 378, A = 45: Frequency =473.287
Channel = 174, N = 378, A = 46: Frequency =473.306
Channel = 175, N = 378, A = 47: Frequency =473.325
Channel = 176, N = 378, A = 48: Frequency =473.344
Channel = 177, N = 378, A = 49: Frequency =473.363
Channel = 178, N = 378, A = 50: Frequency =473.382
Channel = 179, N = 378, A = 51: Frequency =473.401
Channel = 180, N = 378, A = 52: Frequency =473.420
Channel = 181, N = 378, A = 53: Frequency =473.439
Channel = 182, N = 378, A = 54: Frequency =473.458
Channel = 183, N = 378, A = 55: Frequency =473.477
Channel = 184, N = 378, A = 56: Frequency =473.496
Channel = 185, N = 378, A = 57: Frequency =473.515
Channel = 186, N = 378, A = 58: Frequency =473.534
Channel = 187, N = 378, A = 59: Frequency =473.553
Channel = 188, N = 378, A = 60: Frequency =473.572
Channel = 189, N = 378, A = 61: Frequency =473.591
Channel = 190, N = 378, A = 62: Frequency =473.610
Channel = 191, N = 378, A = 63: Frequency =473.629
Channel = 192, N = 379, A = 0: Frequency =473.648
Channel = 193, N = 379, A = 1: Frequency =473.667
Channel = 194, N = 379, A = 2: Frequency =473.686
Channel = 195, N = 379, A = 3: Frequency =473.705

Channel = 196, N = 379, A = 4: Frequency =473.724
Channel = 197, N = 379, A = 5: Frequency =473.743
Channel = 198, N = 379, A = 6: Frequency =473.762
Channel = 199, N = 379, A = 7: Frequency =473.781
Channel = 200, N = 379, A = 8: Frequency =473.800
Channel = 201, N = 379, A = 9: Frequency =473.819
Channel = 202, N = 379, A = 10: Frequency =473.838
Channel = 203, N = 379, A = 11: Frequency =473.857
Channel = 204, N = 379, A = 12: Frequency =473.876
Channel = 205, N = 379, A = 13: Frequency =473.895
Channel = 206, N = 379, A = 14: Frequency =473.914
Channel = 207, N = 379, A = 15: Frequency =473.933
Channel = 208, N = 379, A = 16: Frequency =473.952
Channel = 209, N = 379, A = 17: Frequency =473.971
Channel = 210, N = 379, A = 18: Frequency =473.990
Channel = 211, N = 379, A = 19: Frequency =474.009
Channel = 212, N = 379, A = 20: Frequency =474.028
Channel = 213, N = 379, A = 21: Frequency =474.047
Channel = 214, N = 379, A = 22: Frequency =474.066
Channel = 215, N = 379, A = 23: Frequency =474.085
Channel = 216, N = 379, A = 24: Frequency =474.104
Channel = 217, N = 379, A = 25: Frequency =474.123
Channel = 218, N = 379, A = 26: Frequency =474.142
Channel = 219, N = 379, A = 27: Frequency =474.161
Channel = 220, N = 379, A = 28: Frequency =474.180
Channel = 221, N = 379, A = 29: Frequency =474.199
Channel = 222, N = 379, A = 30: Frequency =474.218
Channel = 223, N = 379, A = 31: Frequency =474.237

Channel = 224, N = 379, A = 32: Frequency =474.256
Channel = 225, N = 379, A = 33: Frequency =474.275
Channel = 226, N = 379, A = 34: Frequency =474.294
Channel = 227, N = 379, A = 35: Frequency =474.313
Channel = 228, N = 379, A = 36: Frequency =474.332
Channel = 229, N = 379, A = 37: Frequency =474.351
Channel = 230, N = 379, A = 38: Frequency =474.370
Channel = 231, N = 379, A = 39: Frequency =474.389
Channel = 232, N = 379, A = 40: Frequency =474.408
Channel = 233, N = 379, A = 41: Frequency =474.427
Channel = 234, N = 379, A = 42: Frequency =474.446
Channel = 235, N = 379, A = 43: Frequency =474.465
Channel = 236, N = 379, A = 44: Frequency =474.484
Channel = 237, N = 379, A = 45: Frequency =474.503
Channel = 238, N = 379, A = 46: Frequency =474.522
Channel = 239, N = 379, A = 47: Frequency =474.541
Channel = 240, N = 379, A = 48: Frequency =474.560
Channel = 241, N = 379, A = 49: Frequency =474.579
Channel = 242, N = 379, A = 50: Frequency =474.598
Channel = 243, N = 379, A = 51: Frequency =474.617
Channel = 244, N = 379, A = 52: Frequency =474.636
Channel = 245, N = 379, A = 53: Frequency =474.655
Channel = 246, N = 379, A = 54: Frequency =474.674
Channel = 247, N = 379, A = 55: Frequency =474.693
Channel = 248, N = 379, A = 56: Frequency =474.712
Channel = 249, N = 379, A = 57: Frequency =474.731
Channel = 250, N = 379, A = 58: Frequency =474.750
Channel = 251, N = 379, A = 59: Frequency =474.769

Channel = 252, N = 379, A = 60: Frequency =474.788
Channel = 253, N = 379, A = 61: Frequency =474.807
Channel = 254, N = 379, A = 62: Frequency =474.826
Channel = 255, N = 379, A = 63: Frequency =474.845
Channel = 256, N = 380, A = 0: Frequency =474.864
Channel = 257, N = 380, A = 1: Frequency =474.883
Channel = 258, N = 380, A = 2: Frequency =474.902
Channel = 259, N = 380, A = 3: Frequency =474.921
Channel = 260, N = 380, A = 4: Frequency =474.940
Channel = 261, N = 380, A = 5: Frequency =474.959
Channel = 262, N = 380, A = 6: Frequency =474.978
Channel = 263, N = 380, A = 7: Frequency =474.997
Channel = 264, N = 380, A = 8: Frequency =475.016
Channel = 265, N = 380, A = 9: Frequency =475.035
Channel = 266, N = 380, A = 10: Frequency =475.054
Channel = 267, N = 380, A = 11: Frequency =475.073
Channel = 268, N = 380, A = 12: Frequency =475.092
Channel = 269, N = 380, A = 13: Frequency =475.111
Channel = 270, N = 380, A = 14: Frequency =475.130
Channel = 271, N = 380, A = 15: Frequency =475.149
Channel = 272, N = 380, A = 16: Frequency =475.168
Channel = 273 N = 380, A = 17: Frequency =475.187
Channel = 274, N = 380, A = 18: Frequency =475.206
Channel = 275, N = 380, A = 19: Frequency =475.225
Channel = 276, N = 380, A = 20: Frequency =475.244
Channel = 277, N = 380, A = 21: Frequency =475.263
Channel = 278, N = 380, A = 22: Frequency =475.282
Channel = 279, N = 380, A = 23: Frequency =475.301

Channel = 280, N = 380, A = 24: Frequency =475.320
Channel = 281, N = 380, A = 25: Frequency =475.339
Channel = 282, N = 380, A = 26: Frequency =475.358
Channel = 283, N = 380, A = 27: Frequency =475.377
Channel = 284, N = 380, A = 28: Frequency =475.396
Channel = 285, N = 380, A = 29: Frequency =475.415
Channel = 286, N = 380, A = 30: Frequency =475.434
Channel = 287, N = 380, A = 31: Frequency =475.453
Channel = 288, N = 380, A = 32: Frequency =475.472
Channel = 289, N = 380, A = 33: Frequency =475.491
Channel = 290, N = 380, A = 34: Frequency =475.510
Channel = 291, N = 380, A = 35: Frequency =475.529
Channel = 292, N = 380, A = 36: Frequency =475.548
Channel = 293, N = 380, A = 37: Frequency =475.567
Channel = 294, N = 380, A = 38: Frequency =475.586
Channel = 295, N = 380, A = 39: Frequency =475.605
Channel = 296, N = 380, A = 40: Frequency =475.624
Channel = 297, N = 380, A = 41: Frequency =475.643
Channel = 298, N = 380, A = 42: Frequency =475.662
Channel = 299, N = 380, A = 43: Frequency =475.681
Channel = 300, N = 380, A = 44: Frequency =475.700
Channel = 301, N = 380, A = 45: Frequency =475.719
Channel = 302, N = 380, A = 46: Frequency =475.738
Channel = 303, N = 380, A = 47: Frequency =475.757
Channel = 304, N = 380, A = 48: Frequency =475.776
Channel = 305, N = 380, A = 49: Frequency =475.795
Channel = 306, N = 380, A = 50: Frequency =475.814
Channel = 307, N = 380, A = 51: Frequency =475.833

Channel = 308, N = 380, A = 52: Frequency =475.852
Channel = 309, N = 380, A = 53: Frequency =475.871
Channel = 310, N = 380, A = 54: Frequency =475.890
Channel = 311, N = 380, A = 55: Frequency =475.909
Channel = 312, N = 380, A = 56: Frequency =475.928
Channel = 313, N = 380, A = 57: Frequency =475.947
Channel = 314, N = 380, A = 58: Frequency =475.966
Channel = 315, N = 380, A = 59: Frequency =475.985
Channel = 316, N = 380, A = 60: Frequency =476.004
Channel = 317, N = 380, A = 61: Frequency =476.023
Channel = 318, N = 380, A = 62: Frequency =476.042
Channel = 319, N = 380, A = 63: Frequency =476.061
Channel = 320, N = 381, A = 0: Frequency =476.080
Channel = 321, N = 381, A = 1: Frequency =476.099
Channel = 322, N = 381, A = 2: Frequency =476.118
Channel = 323, N = 381, A = 3: Frequency =476.137
Channel = 324, N = 381, A = 4: Frequency =476.156
Channel = 325, N = 381, A = 5: Frequency =476.175
Channel = 326, N = 381, A = 6: Frequency =476.194
Channel = 327, N = 381, A = 7: Frequency =476.213
Channel = 328, N = 381, A = 8: Frequency =476.232
Channel = 329, N = 381, A = 9: Frequency =476.251
Channel = 330, N = 381, A = 10: Frequency =476.270
Channel = 331, N = 381, A = 11: Frequency =476.289
Channel = 332, N = 381, A = 12: Frequency =476.308
Channel = 333, N = 381, A = 13: Frequency =476.327
Channel = 334, N = 381, A = 14: Frequency =476.346
Channel = 335, N = 381, A = 15: Frequency =476.365

Channel = 336, N = 381, A = 16: Frequency =476.384
Channel = 337, N = 381, A = 17: Frequency =476.403
Channel = 338, N = 381, A = 18: Frequency =476.422
Channel = 339, N = 381, A = 19: Frequency =476.441
Channel = 340, N = 381, A = 20: Frequency =476.460
Channel = 341, N = 381, A = 21: Frequency =476.479
Channel = 342, N = 381, A = 22: Frequency =476.498
Channel = 343, N = 381, A = 23: Frequency =476.517
Channel = 344, N = 381, A = 24: Frequency =476.536
Channel = 345, N = 381, A = 25: Frequency =476.555
Channel = 346, N = 381, A = 26: Frequency =476.574
Channel = 347, N = 381, A = 27: Frequency =476.593
Channel = 348, N = 381, A = 28: Frequency =476.612
Channel = 349, N = 381, A = 29: Frequency =476.631
Channel = 350, N = 381, A = 30: Frequency =476.650
Channel = 351, N = 381, A = 31: Frequency =476.669
Channel = 352, N = 381, A = 32: Frequency =476.688
Channel = 353, N = 381, A = 33: Frequency =476.707
Channel = 354, N = 381, A = 34: Frequency =476.726
Channel = 355, N = 381, A = 35: Frequency =476.745
Channel = 356, N = 381, A = 36: Frequency =476.764
Channel = 357, N = 381, A = 37: Frequency =476.783
Channel = 358, N = 381, A = 38: Frequency =476.802
Channel = 359, N = 381, A = 39: Frequency =476.821
Channel = 360, N = 381, A = 40: Frequency =476.840
Channel = 361, N = 381, A = 41: Frequency =476.859
Channel = 362, N = 381, A = 42: Frequency =476.878
Channel = 363, N = 381, A = 43: Frequency =476.897

Channel = 364, N = 381, A = 44: Frequency =476.916
Channel = 365, N = 381, A = 45: Frequency =476.935
Channel = 366, N = 381, A = 46: Frequency =476.954
Channel = 367, N = 381, A = 47: Frequency =476.973
Channel = 368, N = 381, A = 48: Frequency =476.992
Channel = 369, N = 381, A = 49: Frequency =477.011
Channel = 370, N = 381, A = 50: Frequency =477.030
Channel = 371, N = 381, A = 51: Frequency =477.049
Channel = 372, N = 381, A = 52: Frequency =477.068
Channel = 373, N = 381, A = 53: Frequency =477.087
Channel = 374, N = 381, A = 54: Frequency =477.106
Channel = 375, N = 381, A = 55: Frequency =477.125
Channel = 376, N = 381, A = 56: Frequency =477.144
Channel = 377, N = 381, A = 57: Frequency =477.163
Channel = 378, N = 381, A = 58: Frequency =477.182
Channel = 379, N = 381, A = 59: Frequency =477.201
Channel = 380, N = 381, A = 60: Frequency =477.220
Channel = 381, N = 381, A = 61: Frequency =477.239
Channel = 382, N = 381, A = 62: Frequency =477.258
Channel = 383, N = 381, A = 63: Frequency =477.277
Channel = 384, N = 382, A = 0: Frequency =477.296
Channel = 385, N = 382, A = 1: Frequency =477.315
Channel = 386, N = 382, A = 2: Frequency =477.334
Channel = 387, N = 382, A = 3: Frequency =477.353
Channel = 388, N = 382, A = 4: Frequency =477.372
Channel = 389, N = 382, A = 5: Frequency =477.391
Channel = 390, N = 382, A = 6: Frequency =477.410
Channel = 391, N = 382, A = 7: Frequency =477.429

Channel = 392, N = 382, A = 8: Frequency =477.448
Channel = 393, N = 382, A = 9: Frequency =477.467
Channel = 394, N = 382, A = 10: Frequency =477.486
Channel = 395, N = 382, A = 11: Frequency =477.505
Channel = 396, N = 382, A = 12: Frequency =477.524
Channel = 397, N = 382, A = 13: Frequency =477.543
Channel = 398, N = 382, A = 14: Frequency =477.562
Channel = 399, N = 382, A = 15: Frequency =477.581
Channel = 400, N = 382, A = 16: Frequency =477.600
Channel = 401, N = 382, A = 17: Frequency =477.619
Channel = 402, N = 382, A = 18: Frequency =477.638
Channel = 403, N = 382, A = 19: Frequency =477.657
Channel = 404, N = 382, A = 20: Frequency =477.676
Channel = 405, N = 382, A = 21: Frequency =477.695
Channel = 406, N = 382, A = 22: Frequency =477.714
Channel = 407, N = 382, A = 23: Frequency =477.733
Channel = 408, N = 382, A = 24: Frequency =477.752
Channel = 409, N = 382, A = 25: Frequency =477.771
Channel = 410, N = 382, A = 26: Frequency =477.790
Channel = 411, N = 382, A = 27: Frequency =477.809
Channel = 412, N = 382, A = 28: Frequency =477.828
Channel = 413, N = 382, A = 29: Frequency =477.847
Channel = 414, N = 382, A = 30: Frequency =477.866
Channel = 415, N = 382, A = 31: Frequency =477.885
Channel = 416, N = 382, A = 32: Frequency =477.904
Channel = 417, N = 382, A = 33: Frequency =477.923
Channel = 418, N = 382, A = 34: Frequency =477.942
Channel = 419, N = 382, A = 35: Frequency =477.961

Channel = 420, N = 382, A = 36: Frequency =477.980
Channel = 421, N = 382, A = 37: Frequency =477.999
Channel = 422, N = 382, A = 38: Frequency =478.018
Channel = 423, N = 382, A = 39: Frequency =478.037
Channel = 424, N = 382, A = 40: Frequency =478.056
Channel = 425, N = 382, A = 41: Frequency =478.075
Channel = 426, N = 382, A = 42: Frequency =478.094
Channel = 427, N = 382, A = 43: Frequency =478.113
Channel = 428, N = 382, A = 44: Frequency =478.132
Channel = 429, N = 382, A = 45: Frequency =478.151
Channel = 430, N = 382, A = 46: Frequency =478.170
Channel = 431, N = 382, A = 47: Frequency =478.189
Channel = 432, N = 382, A = 48: Frequency =478.208
Channel = 433, N = 382, A = 49: Frequency =478.227
Channel = 434, N = 382, A = 50: Frequency =478.246
Channel = 435, N = 382, A = 51: Frequency =478.265
Channel = 436, N = 382, A = 52: Frequency =478.284
Channel = 437, N = 382, A = 53: Frequency =478.303
Channel = 438, N = 382, A = 54: Frequency =478.322
Channel = 439, N = 382, A = 55: Frequency =478.341
Channel = 440, N = 382, A = 56: Frequency =478.360
Channel = 441, N = 382, A = 57: Frequency =478.379
Channel = 442, N = 382, A = 58: Frequency =478.398
Channel = 443, N = 382, A = 59: Frequency =478.417
Channel = 444, N = 382, A = 60: Frequency =478.436
Channel = 445, N = 382, A = 61: Frequency =478.455
Channel = 446, N = 382, A = 62: Frequency =478.474
Channel = 447, N = 382, A = 63: Frequency =478.493

Channel = 448, N = 383, A = 0: Frequency =478.512
Channel = 449, N = 383, A = 1: Frequency =478.531
Channel = 450, N = 383, A = 2: Frequency =478.550
Channel = 451, N = 383, A = 3: Frequency =478.569
Channel = 452, N = 383, A = 4: Frequency =478.588
Channel = 453, N = 383, A = 5: Frequency =478.607
Channel = 454, N = 383, A = 6: Frequency =478.626
Channel = 455, N = 383, A = 7: Frequency =478.645
Channel = 456, N = 383, A = 8: Frequency =478.664
Channel = 457, N = 383, A = 9: Frequency =478.683
Channel = 458, N = 383, A = 10: Frequency =478.702
Channel = 459, N = 383, A = 11: Frequency =478.721
Channel = 460, N = 383, A = 12: Frequency =478.740
Channel = 461, N = 383, A = 13: Frequency =478.759
Channel = 462, N = 383, A = 14: Frequency =478.778
Channel = 463, N = 383, A = 15: Frequency =478.797
Channel = 464, N = 383, A = 16: Frequency =478.816
Channel = 465, N = 383, A = 17: Frequency =478.835
Channel = 466, N = 383, A = 18: Frequency =478.854
Channel = 467, N = 383, A = 19: Frequency =478.873
Channel = 468, N = 383, A = 20: Frequency =478.892
Channel = 469, N = 383, A = 21: Frequency =478.911
Channel = 470, N = 383, A = 22: Frequency =478.930
Channel = 471, N = 383, A = 23: Frequency =478.949
Channel = 472, N = 383, A = 24: Frequency =478.968
Channel = 473, N = 383, A = 25: Frequency =478.987
Channel = 474, N = 383, A = 26: Frequency =479.006
Channel = 475, N = 383, A = 27: Frequency =479.025

Channel = 476, N = 383, A = 28: Frequency =479.044
Channel = 477, N = 383, A = 29: Frequency =479.063
Channel = 478, N = 383, A = 30: Frequency =479.082
Channel = 479, N = 383, A = 31: Frequency =479.101
Channel = 480, N = 383, A = 32: Frequency =499.120
Channel = 481, N = 383, A = 33: Frequency =479.139
Channel = 482, N = 383, A = 34: Frequency =479.158
Channel = 483, N = 383, A = 35: Frequency =479.177
Channel = 484, N = 383, A = 36: Frequency =479.196
Channel = 485, N = 383, A = 37: Frequency =479.215
Channel = 486, N = 383, A = 38: Frequency =479.234
Channel = 487, N = 383, A = 39: Frequency =479.253
Channel = 488, N = 383, A = 40: Frequency =479.272
Channel = 489, N = 383, A = 41: Frequency =479.291
Channel = 490, N = 383, A = 42: Frequency =479.310
Channel = 491, N = 383, A = 43: Frequency =479.329
Channel = 492, N = 383, A = 44: Frequency =479.348
Channel = 493, N = 383, A = 45: Frequency =479.367
Channel = 494, N = 383, A = 46: Frequency =479.386
Channel = 495, N = 383, A = 47: Frequency =479.405
Channel = 496, N = 383, A = 48: Frequency =479.424
Channel = 497, N = 383, A = 49: Frequency =479.443
Channel = 498, N = 383, A = 50: Frequency =479.462
Channel = 499, N = 383, A = 51: Frequency =479.481
Channel = 500, N = 383, A = 52: Frequency =479.500
Channel = 501, N = 383, A = 53: Frequency =479.519
Channel = 502, N = 383, A = 54: Frequency =479.538
Channel = 503, N = 383, A = 55: Frequency =479.557

Channel = 504, N = 383, A = 56: Frequency =479.576
Channel = 505, N = 383, A = 57: Frequency =479.595
Channel = 506, N = 383, A = 60: Frequency =479.614
Channel = 507, N = 383, A = 61: Frequency =479.633
Channel = 508, N = 383, A = 62: Frequency =479.652
Channel = 509, N = 383, A = 63: Frequency =479.671
Channel = 510, N = 384, A = 0: Frequency =479.690
Channel = 511, N = 384, A = 1: Frequency =479.709
Channel = 512, N = 384, A = 2: Frequency =479.728
Channel = 513, N = 384, A = 3: Frequency =479.747
Channel = 514, N = 384, A = 4: Frequency =479.766
Channel = 515, N = 384, A = 5: Frequency =479.785
Channel = 516, N = 384, A = 6: Frequency =479.804
Channel = 517, N = 384, A = 7: Frequency =479.823
Channel = 518, N = 384, A = 8: Frequency =479.842
Channel = 519, N = 384, A = 9: Frequency =479.861
Channel = 520, N = 384, A = 10: Frequency =479.880
Channel = 521, N = 384, A = 11: Frequency =479.899
Channel = 522, N = 384, A = 12: Frequency =479.918
Channel = 523, N = 384, A = 13: Frequency =479.937
Channel = 524, N = 384, A = 14: Frequency =479.956
Channel = 525, N = 384, A = 15: Frequency =479.975
Channel = 526, N = 384, A = 16: Frequency =479.994
Channel = 527, N = 384, A = 17: Frequency =480.013
Channel = 528, N = 384, A = 18: Frequency =480.032
Channel = 529, N = 384, A = 19: Frequency =480.051
Channel = 530, N = 384, A = 20: Frequency =480.070
Channel = 531, N = 384, A = 21: Frequency =480.089

Channel = 532, N = 384, A = 22: Frequency =480.108
Channel = 533, N = 384, A = 23: Frequency =480.127
Channel = 534, N = 384, A = 24: Frequency =480.146
Channel = 535, N = 384, A = 25: Frequency =480.165
Channel = 536, N = 384, A = 26: Frequency =480.184
Channel = 537, N = 384, A = 27: Frequency =480.203
Channel = 538, N = 384, A = 28: Frequency =480.222
Channel = 539, N = 384, A = 29: Frequency =480.241
Channel = 540, N = 384, A = 30: Frequency =480.260
Channel = 541, N = 384, A = 31: Frequency =480.279
Channel = 542, N = 384, A = 32: Frequency =480.298
Channel = 543, N = 384, A = 33: Frequency =480.317
Channel = 544, N = 384, A = 34: Frequency =480.336
Channel = 545, N = 384, A = 35: Frequency =480.355
Channel = 546, N = 384, A = 36: Frequency =480.374
Channel = 547, N = 384, A = 37: Frequency =480.393
Channel = 548, N = 384, A = 38: Frequency =480.412
Channel = 549, N = 384, A = 39: Frequency =480.431
Channel = 550, N = 384, A = 40: Frequency =480.450
Channel = 551, N = 384, A = 41: Frequency =480.469
Channel = 552, N = 384, A = 42: Frequency =480.488
Channel = 553, N = 384, A = 43: Frequency =480.507
Channel = 554, N = 384, A = 44: Frequency =480.526
Channel = 555, N = 384, A = 45: Frequency =480.545
Channel = 556, N = 384, A = 46: Frequency =480.564
Channel = 557, N = 384, A = 47: Frequency =480.583
Channel = 558, N = 384, A = 48: Frequency =480.602
Channel = 559, N = 384, A = 49: Frequency =480.621

Channel = 560, N = 384, A = 50: Frequency =480.640
Channel = 561, N = 384, A = 51: Frequency =480.659
Channel = 562, N = 384, A = 52: Frequency =480.678
Channel = 563, N = 384, A = 53: Frequency =480.697
Channel = 564, N = 384, A = 54: Frequency =480.716
Channel = 565, N = 384, A = 55: Frequency =480.735
Channel = 566, N = 384, A = 56: Frequency =480.754
Channel = 567, N = 384, A = 57: Frequency =480.773
Channel = 568, N = 384, A = 58: Frequency =480.792
Channel = 569, N = 384, A = 59: Frequency =480.811
Channel = 570, N = 384, A = 60: Frequency =480.830
Channel = 571, N = 384, A = 61: Frequency =480.849
Channel = 572, N = 384, A = 62: Frequency =480.868
Channel = 573, N = 384, A = 63: Frequency =480.887
Channel = 574, N = 385, A = 00: Frequency =480.906
Channel = 575, N = 385, A = 01: Frequency =480.925
Channel = 576, N = 385, A = 02: Frequency =480.944
Channel = 577, N = 385, A = 03: Frequency =480.963
Channel = 578, N = 385, A = 04: Frequency =480.982
Channel = 579, N = 385, A = 05: Frequency =481.001
Channel = 580, N = 385, A = 06: Frequency =481.020
Channel = 581, N = 385, A = 07: Frequency =481.039
Channel = 582, N = 385, A = 08: Frequency =481.058
Channel = 583, N = 385, A = 09: Frequency =481.077
Channel = 584, N = 385, A = 10: Frequency =481.096
Channel = 585, N = 385, A = 11: Frequency =481.115
Channel = 586, N = 385, A = 12: Frequency =481.134
Channel = 587, N = 385, A = 13: Frequency =481.153

Channel = 588, N = 385, A = 14: Frequency =481.172
Channel = 589, N = 385, A = 15: Frequency =481.191
Channel = 590, N = 385, A = 16: Frequency =481.210
Channel = 591, N = 385, A = 17: Frequency =481.229
Channel = 592, N = 385, A = 18: Frequency =481.248
Channel = 593, N = 385, A = 19: Frequency =481.267
Channel = 594, N = 385, A = 20: Frequency =481.286
Channel = 595, N = 385, A = 21: Frequency =481.305
Channel = 596, N = 385, A = 22: Frequency =481.324
Channel = 597, N = 385, A = 23: Frequency =481.343
Channel = 598, N = 385, A = 24: Frequency =481.362
Channel = 599, N = 385, A = 25: Frequency =481.381
Channel = 600, N = 385, A = 26: Frequency =481.400
Channel = 601, N = 385, A = 27: Frequency =481.419
Channel = 602, N = 385, A = 28: Frequency =481.438
Channel = 603, N = 385, A = 29: Frequency =481.457
Channel = 604, N = 385, A = 30: Frequency =481.476
Channel = 605, N = 385, A = 31: Frequency =481.495
Channel = 606, N = 385, A = 32: Frequency =481.514
Channel = 607, N = 385, A = 33: Frequency =481.533
Channel = 608, N = 385, A = 34: Frequency =481.552
Channel = 609, N = 385, A = 35: Frequency =481.571
Channel = 610, N = 385, A = 36: Frequency =481.590
Channel = 611, N = 385, A = 37: Frequency =481.609
Channel = 612, N = 385, A = 38: Frequency =481.628
Channel = 613, N = 385, A = 39: Frequency =481.647
Channel = 614, N = 385, A = 40: Frequency =481.666
Channel = 615, N = 385, A = 41: Frequency =481.685

Channel = 616, N = 385, A = 42: Frequency =481.704
Channel = 617, N = 385, A = 43: Frequency =481.723
Channel = 618, N = 385, A = 44: Frequency =481.742
Channel = 619, N = 385, A = 45: Frequency =481.761
Channel = 620, N = 385, A = 46: Frequency =481.780
Channel = 621, N = 385, A = 47: Frequency =481.799
Channel = 622, N = 385, A = 48: Frequency =481.818
Channel = 623, N = 385, A = 49: Frequency =481.837
Channel = 624, N = 385, A = 50: Frequency =481.856
Channel = 625, N = 385, A = 51: Frequency =481.875
Channel = 626, N = 385, A = 52: Frequency =481.894
Channel = 627, N = 385, A = 53: Frequency =481.913
Channel = 628, N = 385, A = 54: Frequency =481.932
Channel = 629, N = 385, A = 55: Frequency =481.951
Channel = 630, N = 385, A = 56: Frequency =481.970
Channel = 631, N = 385, A = 57: Frequency =481.989
Channel = 632, N = 385, A = 58: Frequency =482.008
Channel = 633, N = 385, A = 59: Frequency =482.027
Channel = 634, N = 385, A = 60: Frequency =482.046
Channel = 635, N = 385, A = 61: Frequency =482.065
Channel = 636, N = 385, A = 62: Frequency =482.084
Channel = 637, N = 385, A = 63: Frequency =482.103
Channel = 638, N = 386, A = 00: Frequency =482.122
Channel = 639, N = 386, A = 01: Frequency =482.141
Channel = 640, N = 386, A = 02: Frequency =482.160
Channel = 641, N = 386, A = 03: Frequency =482.179
Channel = 642, N = 386, A = 04: Frequency =482.198
Channel = 643, N = 386, A = 05: Frequency =482.217

Channel = 644, N = 386, A = 06: Frequency =482.236
Channel = 645, N = 386, A = 07: Frequency =482.255
Channel = 646, N = 386, A = 08: Frequency =482.274
Channel = 647, N = 386, A = 09: Frequency =482.293
Channel = 648, N = 386, A = 10: Frequency =482.312
Channel = 649, N = 386, A = 11: Frequency =482.331
Channel = 650, N = 386, A = 12: Frequency =482.350
Channel = 651, N = 386, A = 13: Frequency =482.369
Channel = 652, N = 386, A = 14: Frequency =482.388
Channel = 653, N = 386, A = 15: Frequency =482.407
Channel = 654, N = 386, A = 16: Frequency =482.426
Channel = 655, N = 386, A = 17: Frequency =482.445
Channel = 656, N = 386, A = 18: Frequency =482.464
Channel = 657, N = 386, A = 19: Frequency =482.483
Channel = 658, N = 386, A = 20: Frequency =482.502
Channel = 659, N = 386, A = 21: Frequency =482.521
Channel = 660, N = 386, A = 22: Frequency =482.540
Channel = 661, N = 386, A = 23: Frequency =482.559
Channel = 662, N = 386, A = 24: Frequency =482.578
Channel = 663, N = 386, A = 25: Frequency =482.597
Channel = 664, N = 386, A = 26: Frequency =482.616
Channel = 665, N = 386, A = 27: Frequency =482.635
Channel = 666, N = 386, A = 28: Frequency =482.654
Channel = 667, N = 386, A = 29: Frequency =482.673
Channel = 668, N = 386, A = 30: Frequency =482.692
Channel = 669, N = 386, A = 31: Frequency =482.711
Channel = 670, N = 386, A = 32: Frequency =482.730
Channel = 671, N = 386, A = 33: Frequency =482.749

Channel = 672, N = 386, A = 34: Frequency =482.768
Channel = 673, N = 386, A = 35: Frequency =482.787
Channel = 674, N = 386, A = 36: Frequency =482.806
Channel = 675, N = 386, A = 37: Frequency =482.825
Channel = 676, N = 386, A = 38: Frequency =482.844
Channel = 677, N = 386, A = 39: Frequency =482.863
Channel = 678, N = 386, A = 40: Frequency =482.882
Channel = 679, N = 386, A = 41: Frequency =482.901
Channel = 680, N = 386, A = 42: Frequency =482.920
Channel = 681, N = 386, A = 43: Frequency =482.939
Channel = 682, N = 386, A = 44: Frequency =482.958
Channel = 683, N = 386, A = 45: Frequency =482.977
Channel = 684, N = 386, A = 46: Frequency =482.996
Channel = 685, N = 386, A = 47: Frequency =483.015
Channel = 686, N = 386, A = 48: Frequency =483.034
Channel = 687, N = 386, A = 49: Frequency =483.053
Channel = 688, N = 386, A = 50: Frequency =483.072
Channel = 689, N = 386, A = 51: Frequency =483.091
Channel = 690, N = 386, A = 52: Frequency =483.110
Channel = 691, N = 386, A = 53: Frequency =483.129
Channel = 692, N = 386, A = 54: Frequency =483.148
Channel = 693, N = 386, A = 55: Frequency =483.167
Channel = 694, N = 386, A = 56: Frequency =483.186
Channel = 695, N = 386, A = 57: Frequency =483.205
Channel = 696, N = 386, A = 58: Frequency =483.224
Channel = 697, N = 386, A = 59: Frequency =483.243
Channel = 698, N = 386, A = 60: Frequency =483.262
Channel = 699, N = 386, A = 61: Frequency =483.281

Channel = 700, N = 386, A = 62: Frequency =483.300
Channel = 701, N = 386, A = 63: Frequency =483.319
Channel = 702, N = 387, A = 00: Frequency =483.338
Channel = 703, N = 387, A = 01: Frequency =483.357
Channel = 704, N = 387, A = 02: Frequency =483.376
Channel = 705, N = 387, A = 03: Frequency =483.395
Channel = 706, N = 387, A = 04: Frequency =483.414
Channel = 707, N = 387, A = 05: Frequency =483.433
Channel = 708, N = 387, A = 06: Frequency =483.452
Channel = 709, N = 387, A = 07: Frequency =483.471
Channel = 710, N = 387, A = 08: Frequency =483.490
Channel = 711, N = 387, A = 09: Frequency =483.509
Channel = 712, N = 387, A = 10: Frequency =483.528
Channel = 713, N = 387, A = 11: Frequency =483.547
Channel = 714, N = 387, A = 12: Frequency =483.566
Channel = 715, N = 387, A = 13: Frequency =483.585
Channel = 716, N = 387, A = 14: Frequency =483.604
Channel = 717, N = 387, A = 15: Frequency =483.623
Channel = 718, N = 387, A = 16: Frequency =483.642
Channel = 719, N = 387, A = 17: Frequency =483.661
Channel = 720, N = 387, A = 18: Frequency =483.680
Channel = 721, N = 387, A = 19: Frequency =483.699
Channel = 722, N = 387, A = 20: Frequency =483.718
Channel = 723, N = 387, A = 21: Frequency =483.737
Channel = 724, N = 387, A = 22: Frequency =483.756
Channel = 725, N = 387, A = 23: Frequency =483.775
Channel = 726, N = 387, A = 24: Frequency =483.794
Channel = 727, N = 387, A = 25: Frequency =483.813

Channel = 728, N = 387, A = 26: Frequency =483.832
Channel = 729, N = 387, A = 27: Frequency =483.851
Channel = 730, N = 387, A = 28: Frequency =483.870
Channel = 731, N = 387, A = 29: Frequency =483.889
Channel = 732, N = 387, A = 30: Frequency =483.908
Channel = 733, N = 387, A = 31: Frequency =483.927
Channel = 734, N = 387, A = 32: Frequency =483.946
Channel = 735, N = 387, A = 33: Frequency =483.965
Channel = 736, N = 387, A = 34: Frequency =483.984
Channel = 737, N = 387, A = 35: Frequency =484.003
Channel = 738, N = 387, A = 36: Frequency =484.022
Channel = 739, N = 387, A = 37: Frequency =484.041
Channel = 740, N = 387, A = 38: Frequency =484.060
Channel = 741, N = 387, A = 39: Frequency =484.079
Channel = 742, N = 387, A = 40: Frequency =484.098
Channel = 743, N = 387, A = 41: Frequency =484.117
Channel = 744, N = 387, A = 42: Frequency =484.136
Channel = 745, N = 387, A = 43: Frequency =484.155
Channel = 746, N = 387, A = 44: Frequency =484.174
Channel = 747, N = 387, A = 45: Frequency =484.193
Channel = 748, N = 387, A = 46: Frequency =484.212
Channel = 749, N = 387, A = 47: Frequency =484.231
Channel = 750, N = 387, A = 48: Frequency =484.250
Channel = 751, N = 387, A = 49: Frequency =484.269
Channel = 752, N = 387, A = 50: Frequency =484.288
Channel = 753, N = 387, A = 51: Frequency =484.307
Channel = 754, N = 387, A = 52: Frequency =484.326
Channel = 755, N = 387, A = 53: Frequency =484.345

Channel = 756, N = 387, A = 54: Frequency =484.364
Channel = 757, N = 387, A = 55: Frequency =484.383
Channel = 758, N = 387, A = 56: Frequency =484.402
Channel = 759, N = 387, A = 57: Frequency =484.421
Channel = 760, N = 387, A = 58: Frequency =484.440
Channel = 761, N = 387, A = 59: Frequency =484.459
Channel = 762, N = 387, A = 60: Frequency =484.478
Channel = 763, N = 387, A = 61: Frequency =484.497
Channel = 764, N = 387, A = 62: Frequency =484.516
Channel = 765, N = 387, A = 63: Frequency =484.535
Channel = 766, N = 388, A = 00: Frequency =484.554
Channel = 767, N = 388, A = 01: Frequency =484.573
Channel = 768, N = 388, A = 02: Frequency =484.592
Channel = 769, N = 388, A = 03: Frequency =484.611
Channel = 770, N = 388, A = 04: Frequency =484.630
Channel = 771, N = 388, A = 05: Frequency =484.659
Channel = 772, N = 388, A = 06: Frequency =484.668
Channel = 773, N = 388, A = 07: Frequency =484.687
Channel = 774, N = 388, A = 08: Frequency =484.706
Channel = 775, N = 388, A = 09: Frequency =484.725
Channel = 776, N = 388, A = 10: Frequency =484.744
Channel = 777, N = 388, A = 11: Frequency =484.763
Channel = 778, N = 388, A = 12: Frequency =484.782
Channel = 779, N = 388, A = 13: Frequency =484.801
Channel = 780, N = 388, A = 14: Frequency =484.820
Channel = 781, N = 388, A = 15: Frequency =484.839
Channel = 782, N = 388, A = 16: Frequency =484.858
Channel = 783, N = 388, A = 17: Frequency =484.877

Channel = 784, N = 388, A = 18: Frequency =484.896
Channel = 785, N = 388, A = 19: Frequency =484.915
Channel = 786, N = 388, A = 20: Frequency =484.934
Channel = 787, N = 388, A = 21: Frequency =484.953
Channel = 788, N = 388, A = 22: Frequency =484.972
Channel = 789, N = 388, A = 23: Frequency =484.991
Channel = 790, N = 388, A = 24: Frequency =485.010
Channel = 791, N = 388, A = 25: Frequency =485.029
Channel = 792, N = 388, A = 26: Frequency =485.048
Channel = 793, N = 388, A = 27: Frequency =485.067
Channel = 794, N = 388, A = 28: Frequency =485.086
Channel = 795, N = 388, A = 29: Frequency =485.105
Channel = 796, N = 388, A = 30: Frequency =485.124
Channel = 797, N = 388, A = 31: Frequency =485.143
Channel = 798, N = 388, A = 32: Frequency =485.162
Channel = 799, N = 388, A = 33: Frequency =485.181
Channel = 800, N = 388, A = 34: Frequency =485.200
Channel = 801, N = 388, A = 35: Frequency =485.219
Channel = 802, N = 388, A = 36: Frequency =485.238
Channel = 803, N = 388, A = 37: Frequency =485.257
Channel = 804, N = 388, A = 38: Frequency =485.276
Channel = 805, N = 388, A = 39: Frequency =485.295
Channel = 806, N = 388, A = 40: Frequency =485.314
Channel = 807, N = 388, A = 41: Frequency =485.333
Channel = 808, N = 388, A = 42: Frequency =485.352
Channel = 809, N = 388, A = 43: Frequency =485.371
Channel = 810, N = 388, A = 44: Frequency =485.390
Channel = 811, N = 388, A = 45: Frequency =485.409

Channel = 812, N = 388, A = 46: Frequency =485.428
Channel = 813, N = 388, A = 47: Frequency =485.447
Channel = 814, N = 388, A = 48: Frequency =485.466
Channel = 815, N = 388, A = 49: Frequency =485.485
Channel = 816, N = 388, A = 50: Frequency =485.504
Channel = 817, N = 388, A = 51: Frequency =485.523
Channel = 818, N = 388, A = 52: Frequency =485.542
Channel = 819, N = 388, A = 53: Frequency =485.561
Channel = 820, N = 388, A = 54: Frequency =485.580
Channel = 821, N = 388, A = 55: Frequency =485.599
Channel = 822, N = 388, A = 56: Frequency =485.618
Channel = 823, N = 388, A = 57: Frequency =485.637
Channel = 824, N = 388, A = 58: Frequency =485.656
Channel = 825, N = 388, A = 59: Frequency =485.675
Channel = 826, N = 388, A = 60: Frequency =485.694
Channel = 827, N = 388, A = 61: Frequency =485.713
Channel = 828, N = 388, A = 62: Frequency =485.732
Channel = 829, N = 388, A = 63: Frequency =485.751
Channel = 830, N = 389, A = 00: Frequency =485.770
Channel = 831, N = 389, A = 01: Frequency =485.789
Channel = 832, N = 389, A = 02: Frequency =485.808
Channel = 833, N = 389, A = 03: Frequency =485.827
Channel = 834, N = 389, A = 04: Frequency =485.846
Channel = 835, N = 389, A = 05: Frequency =485.865
Channel = 836, N = 389, A = 06: Frequency =485.884
Channel = 837, N = 389, A = 07: Frequency =485.903
Channel = 838, N = 389, A = 08: Frequency =485.922
Channel = 839, N = 389, A = 09: Frequency =485.941

Channel = 840, N = 389, A = 10: Frequency =485.960
Channel = 841, N = 389, A = 12: Frequency =485.979
Channel = 842, N = 389, A = 13: Frequency =485.998
Channel = 843, N = 389, A = 14: Frequency =486.017
Channel = 844, N = 389, A = 15: Frequency =486.036
Channel = 845, N = 389, A = 16: Frequency =486.055
Channel = 846, N = 389, A = 17: Frequency =486.074
Channel = 847, N = 389, A = 18: Frequency =486.093
Channel = 848, N = 389, A = 19: Frequency =486.112
Channel = 849, N = 389, A = 20: Frequency =486.131
Channel = 850, N = 389, A = 21: Frequency =486.150
Channel = 851, N = 389, A = 22: Frequency =486.169
Channel = 852, N = 389, A = 23: Frequency =486.188
Channel = 853, N = 389, A = 24: Frequency =486.207
Channel = 854, N = 389, A = 25: Frequency =486.226
Channel = 855, N = 389, A = 26: Frequency =486.245
Channel = 856, N = 389, A = 27: Frequency =486.264
Channel = 857, N = 389, A = 28: Frequency =486.283
Channel = 858, N = 389, A = 29: Frequency =486.302
Channel = 859, N = 389, A = 30: Frequency =486.321
Channel = 860, N = 389, A = 31: Frequency =486.340
Channel = 861, N = 389, A = 32: Frequency =486.359
Channel = 862, N = 389, A = 33: Frequency =486.378
Channel = 863, N = 389, A = 34: Frequency =486.397
Channel = 864, N = 389, A = 35: Frequency =486.416
Channel = 865, N = 389, A = 36: Frequency =486.435
Channel = 866, N = 389, A = 37: Frequency =486.454
Channel = 867, N = 389, A = 38: Frequency =486.473

Channel = 868, N = 389, A = 39: Frequency =486.492
Channel = 869, N = 389, A = 40: Frequency =486.511
Channel = 870, N = 389, A = 41: Frequency =486.530
Channel = 871, N = 389, A = 42: Frequency =486.549
Channel = 872, N = 389, A = 43: Frequency =486.568
Channel = 873, N = 389, A = 44: Frequency =486.587
Channel = 874, N = 389, A = 45: Frequency =486.606
Channel = 875, N = 389, A = 46: Frequency =486.625
Channel = 876, N = 389, A = 47: Frequency =486.644
Channel = 877, N = 389, A = 48: Frequency =486.663
Channel = 878, N = 389, A = 49: Frequency =486.682
Channel = 879, N = 389, A = 50: Frequency =486.701
Channel = 880, N = 389, A = 51: Frequency =486.720
Channel = 881, N = 389, A = 52: Frequency =486.739
Channel = 882, N = 389, A = 53: Frequency =486.758
Channel = 883, N = 389, A = 54: Frequency =486.777
Channel = 885, N = 389, A = 55: Frequency =486.796
Channel = 886, N = 389, A = 56: Frequency =486.815
Channel = 887, N = 389, A = 57: Frequency =486.834
Channel = 888, N = 389, A = 58: Frequency =486.853
Channel = 889, N = 389, A = 59: Frequency =486.872
Channel = 890, N = 389, A = 60: Frequency =486.891
Channel = 891, N = 389, A = 61: Frequency =486.910
Channel = 892, N = 389, A = 62: Frequency =486.929
Channel = 893, N = 389, A = 63: Frequency =486.948
Channel = 894, N = 390, A = 00: Frequency =486.967
Channel = 895, N = 390, A = 01: Frequency =486.986
Channel = 896, N = 390, A = 02: Frequency =487.005

Channel = 897, N = 390, A = 03: Frequency =487.024
Channel = 898, N = 390, A = 04: Frequency =487.043
Channel = 899, N = 390, A = 05: Frequency =487.062
Channel = 900, N = 390, A = 06: Frequency =487.081
Channel = 901, N = 390, A = 07: Frequency =487.100
Channel = 902, N = 390, A = 08: Frequency =487.119
Channel = 903, N = 390, A = 09: Frequency =487.138
Channel = 904, N = 390, A = 10: Frequency =487.157
Channel = 905, N = 390, A = 11: Frequency =487.176
Channel = 906, N = 390, A = 12: Frequency =487.195
Channel = 907, N = 390, A = 13: Frequency =487.214
Channel = 908, N = 390, A = 14: Frequency =487.233
Channel = 909, N = 390, A = 15: Frequency =487.252
Channel = 910, N = 390, A = 16: Frequency =487.271
Channel = 911, N = 390, A = 17: Frequency =487.290
Channel = 912, N = 390, A = 18: Frequency =487.309
Channel = 913, N = 390, A = 19: Frequency =487.328
Channel = 914, N = 390, A = 20: Frequency =487.347
Channel = 915, N = 390, A = 21: Frequency =487.366
Channel = 916, N = 390, A = 22: Frequency =487.385
Channel = 917, N = 390, A = 23: Frequency =487.404
Channel = 918, N = 390, A = 24: Frequency =487.423
Channel = 919, N = 390, A = 25: Frequency =487.442
Channel = 920, N = 390, A = 26: Frequency =487.461
Channel = 921, N = 390, A = 27: Frequency =487.480
Channel = 922, N = 390, A = 28: Frequency =487.499
Channel = 923, N = 390, A = 29: Frequency =487.518
Channel = 924, N = 390, A = 30: Frequency =487.537

Channel = 925, N = 390, A = 31: Frequency =487.556
Channel = 926, N = 390, A = 32: Frequency =487.575
Channel = 927, N = 390, A = 33: Frequency =487.594
Channel = 928, N = 390, A = 34: Frequency =487.613
Channel = 929, N = 390, A = 35: Frequency =487.632
Channel = 930, N = 390, A = 36: Frequency =487.651
Channel = 931, N = 390, A = 37: Frequency =487.670
Channel = 932, N = 390, A = 38: Frequency =487.689
Channel = 933, N = 390, A = 39: Frequency =487.708
Channel = 934, N = 390, A = 40: Frequency =487.727
Channel = 935, N = 390, A = 41: Frequency =487.746
Channel = 936, N = 390, A = 42: Frequency =487.765
Channel = 937, N = 390, A = 43: Frequency =487.784
Channel = 938, N = 390, A = 44: Frequency =487.803
Channel = 939, N = 390, A = 45: Frequency =487.822
Channel = 940, N = 390, A = 46: Frequency =487.841
Channel = 941, N = 390, A = 47: Frequency =487.860
Channel = 942, N = 390, A = 48: Frequency =487.879
Channel = 943, N = 390, A = 49: Frequency =487.898
Channel = 944, N = 390, A = 50: Frequency =487.917
Channel = 945, N = 390, A = 51: Frequency =487.936
Channel = 946, N = 390, A = 52: Frequency =487.955
Channel = 947, N = 390, A = 53: Frequency =487.974
Channel = 948, N = 390, A = 54: Frequency =487.993
Channel = 949, N = 390, A = 55: Frequency =488.012
Channel = 950, N = 390, A = 56: Frequency =488.031
Channel = 951, N = 390, A = 57: Frequency =488.050
Channel = 952, N = 390, A = 58: Frequency =488.069

Channel = 953, N = 390, A = 59: Frequency =488.088
Channel = 954, N = 390, A = 60: Frequency =488.107
Channel = 955, N = 390, A = 61: Frequency =488.126
Channel = 956, N = 390, A = 62: Frequency =488.145
Channel = 957, N = 390, A = 63: Frequency =488.164
Channel = 958, N = 391, A = 00: Frequency =488.183
Channel = 959, N = 391, A = 01: Frequency =488.202
Channel = 960, N = 391, A = 02: Frequency =488.221
Channel = 961, N = 391, A = 03: Frequency =488.240
Channel = 962, N = 391, A = 04: Frequency =488.259
Channel = 963, N = 391, A = 05: Frequency =488.278
Channel = 964, N = 391, A = 06: Frequency =488.297
Channel = 965, N = 391, A = 07: Frequency =488.316
Channel = 966, N = 391, A = 08: Frequency =488.335
Channel = 967, N = 391, A = 09: Frequency =488.354
Channel = 968, N = 391, A = 10: Frequency =488.373
Channel = 969, N = 391, A = 11: Frequency =488.392
Channel = 970, N = 391, A = 12: Frequency =488.411
Channel = 971, N = 391, A = 13: Frequency =488.430
Channel = 972, N = 391, A = 14: Frequency =488.449
Channel = 973, N = 391, A = 15: Frequency =488.468
Channel = 974, N = 391, A = 16: Frequency =488.487
Channel = 975, N = 391, A = 17: Frequency =488.506
Channel = 976, N = 391, A = 18: Frequency =488.525
Channel = 977, N = 391, A = 19: Frequency =488.544
Channel = 978, N = 391, A = 20: Frequency =488.563
Channel = 979, N = 391, A = 21: Frequency =488.582
Channel = 980, N = 391, A = 22: Frequency =488.601

Channel = 981, N = 391, A = 23: Frequency =488.620
Channel = 982, N = 391, A = 24: Frequency =488.639
Channel = 983, N = 391, A = 25: Frequency =488.658
Channel = 984, N = 391, A = 26: Frequency =488.677
Channel = 985, N = 391, A = 27: Frequency =488.696
Channel = 986, N = 391, A = 28: Frequency =488.715
Channel = 987, N = 391, A = 29: Frequency =488.734
Channel = 988, N = 391, A = 30: Frequency =488.753
Channel = 989, N = 391, A = 31: Frequency =488.772
Channel = 990, N = 391, A = 32: Frequency =488.791
Channel = 991, N = 391, A = 33: Frequency =488.810
Channel = 992, N = 391, A = 34: Frequency =488.829
Channel = 993, N = 391, A = 35: Frequency =488.848
Channel = 994, N = 391, A = 36: Frequency =488.867
Channel = 995, N = 391, A = 37: Frequency =488.886
Channel = 996, N = 391, A = 38: Frequency =488.905
Channel = 997, N = 391, A = 39: Frequency =488.924
Channel = 998, N = 391, A = 40: Frequency =488.943
Channel = 999, N = 391, A = 41: Frequency =488.962
Channel = 1000, N = 391, A =42: Frequency =488.981
Channel = 1001, N = 391, A =43: Frequency =489.000
Channel = 1002, N = 391, A =44: Frequency =489.019
Channel = 1003, N = 391, A =45: Frequency =489.038
Channel = 1004, N = 391, A =46: Frequency =489.057
Channel = 1005, N = 391, A =47: Frequency =489.076
Channel = 1006, N = 391, A =48: Frequency =489.095
Channel = 1007, N = 391, A =49: Frequency =489.114
Channel = 1008, N = 391, A =50: Frequency =489.133

Channel = 1009, N = 391, A =51: Frequency =489.152
Channel = 1010, N = 391, A =52: Frequency =489.171
Channel = 1011, N = 391, A =53: Frequency =489.190
Channel = 1012, N = 391, A =54: Frequency =489.209
Channel = 1013, N = 391, A =55: Frequency =489.228
Channel = 1014, N = 391, A =56: Frequency =489.247
Channel = 1015, N = 391, A =57: Frequency =489.266
Channel = 1016, N = 391, A =58: Frequency =489.285
Channel = 1017, N = 391, A =59: Frequency =489.304
Channel = 1018, N = 391, A =60: Frequency =489.323
Channel = 1019, N = 391, A =61: Frequency =489.342
Channel = 1020, N = 391, A =62: Frequency =489.361
Channel = 1021, N = 391, A =63: Frequency =489.380
Channel = 1022, N = 392, A =00: Frequency =489.399
Channel = 1023, N = 392, A =01: Frequency =489.418
Channel = 1024, N = 392, A =02: Frequency =489.437
Channel = 1025, N = 392, A =03: Frequency =489.456
Channel = 1026, N = 392, A =04: Frequency =489.475
Channel = 1027, N = 392, A =05: Frequency =489.494
Channel = 1028, N = 392, A =06: Frequency =489.513
Channel = 1029, N = 392, A =07: Frequency =489.532
Channel = 1030, N = 392, A =08: Frequency =489.551
Channel = 1031, N = 392, A =09: Frequency =489.570
Channel = 1032, N = 392, A =10: Frequency =489.589
Channel = 1033, N = 392, A =11: Frequency =489.608
Channel = 1034, N = 392, A =12: Frequency =489.627
Channel = 1035, N = 392, A =13: Frequency =489.646
Channel = 1037, N = 392, A =14: Frequency =489.665

Channel = 1038, N = 392, A =15: Frequency =489.684
Channel = 1039, N = 392, A =16: Frequency =489.703
Channel = 1040, N = 392, A =17: Frequency =489.722
Channel = 1041, N = 392, A =18: Frequency =489.741
Channel = 1042, N = 392, A =19: Frequency =489.760
Channel = 1043, N = 392, A =17: Frequency =489.779
Channel = 1044, N = 392, A =20: Frequency =489.798
Channel = 1045, N = 392, A =21: Frequency =489.817
Channel = 1046, N = 392, A =22: Frequency =489.836
Channel = 1047, N = 392, A =23: Frequency =489.855
Channel = 1048, N = 392, A =24: Frequency =489.874
Channel = 1049, N = 392, A =25: Frequency =489.893
Channel = 1050, N = 392, A =26: Frequency =489.912
Channel = 1051, N = 392, A =27: Frequency =489.931
Channel = 1052, N = 392, A =28: Frequency =489.950
Channel = 1053, N = 392, A =29: Frequency =489.969
Channel = 1054, N = 392, A =30: Frequency =489.988
Channel = 1055, N = 392, A =31: Frequency =489.007

ภาคผนวก ค
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่จำเป็น

ประวัติผู้เขียน



นางสาวจุฑารัตน์ ปันสีคำ เกิดวันที่ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528
ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 530 หมู่ที่ 9 ตำบลแม่ปะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนสรรพวิทยาคม จังหวัดตาก ปี
การศึกษา 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา



นายณัฐพัชร์ พรหมสุวรรณ เกิดวันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2526
ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 14/5 หมู่ที่ 1 ตำบลบางรีน อำเภอเมือง จังหวัดระนอง
จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนพิชัยรัตนาคาร จังหวัดระนอง
ปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรม
โทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จังหวัดนครราชสีมา



นายศุภกิตต์ ศิริพนาดร เกิดวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2527 ภูมิลำเนาเดิม
อยู่บ้านเลขที่ 484 หมู่ที่ 5 ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย จบการศึกษา
ระดับชั้นมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร จังหวัดหนองคาย ปี
การศึกษา 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา